



EESTI MAAÜLIKOOL
Tehnikainstituut

Kunnar Kangro

**PÄIKESEPANEELIDE ERINEVATE PAIGALDUSVIISIDE
EELISED JA PUUDUSED**

**THE ADVANTAGES AND DISADVANTAGES OF DIFFERENT
INSTALLATION METHODS FOR SOLAR PANELS**

Magistritöö
Energiakasutuse õppekava

Juhendajad: teadur Alo Allik, *PhD*
professor Andres Annuk, *PhD*

Tartu 2018

Eesti Maaülikool		Magistritöö lühikokkuvõte	
Kreutzwaldi 1, Tartu 51014			
Autor: Kunnar Kangro		Õppekava: Energiakasutus	
Pealkiri: Päikesepaneelide erinevate paigaldusviiside eelised ja puudused			
Lehekülgi:	Jooniseid: 27	Tabeleid: 8	Lisasid: 2
Osakond: Energeetika			
Uurimisvaldkond: 4. Loodusteadused ja tehnika; 4.17 Energeetikaalased uuringud; CERCS ERIALA: T140 Energeetika			
Juhendaja(d): Alo Allik, Andres Annuk			
Kaitsmiskoht ja -aasta: Tartu 2018			
<p>Antud lõputöös tutvustab autor erinevaid tehnoloogiaid, mille abil muundatakse päikeseenergia elektrienergiaks. Tuuakse välja nendega seotud eelised ja puudused ning antakse ülevaade turu olukorrast. Töö eesmärk on uurida päikesepaneelide probleeme ning nende eelistatud paigaldusviise tuginedes modelleeritud süsteemile. Antud tulemuste saavutamiseks on koostatud elamust 3D mudel, hangitud elamu tarbimisandmed, koostatud simulatsioone erinevate PV süsteemidega ning tulemusi omavahel töödeldud. PV süsteemide tasuvusaeg on seda kiirem, mida rohkem suudetakse koha peal toodetud elektrienergiat ära tarbida. Modelleeritud süsteemide puhul suudetakse enim oma tarbeks ära kasutada kaldkatusele paigutatud lahenduste korral, moodustades keskmiselt 34,09% aastasest energiatarbest. Sellest tulenevalt oleks vaadeltavatest variantidest kõige optimaalsemaks lahenduseks just kaldkatusele paigaldatud süsteemid. Arvestades seda, et hoone elektritarbimine perioodil, mil päikesepaneelide tootlikkus on tipus, moodustab keskmiselt 20% kogu päevasest tarbimisest, siis poleks otstarbekas investeerida suurematesse süsteemidesse.</p>			
Märksõnad: taastuvenergia, päikeseelektripaneelid, liginullenergiahooned, energia			

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Abstract of Master's Thesis	
Author: Kunnar Kangro		Curriculum: Energy engineering	
Title: The Advantages and Disadvantages of Different Installation Methods for Solar Panels			
Pages: 63	Figures: 27	Tables: 8	Appendixes: 2
Department: Energetic Research Field of research: 4. Natural Sciences and Engineering; 4.17. Energetic Research CERCS SPECIALITY: T140 Energy Research Supervisors: Alo Allik, Andres Annuk Place and date: Tartu 2018			
In this thesis, the author introduces different technologies, which are used for converting solar energy into electricity. Author explains the disadvantages and advantages of this technology and gives an overview of the market situation. The aim of this thesis is to investigate the problems behind solar panels and to compare their preferred installation methods by relying on the simulated situations. In order to achieve these goals, a 3D model of a building was made, the consumption data of the building was gathered, situations with different PV systems were simulated and then the data got examined. The payback period of the PV systems is shorter the more you are able to consume the produced electricity on site. In the simulated situations, the best numbers were shown in terms of own consumption, in systems which were placed on top of the building's 45° roof. Due to all that, the most optimal solution from all the simulated systems, would be the ones on the inclined roof. Considering the fact, that the building's electricity consumption at the period, when the PV systems production is at its peak, accounts for 20% of the daily consumption, then it would not be rational to invest into bigger systems.			
Keywords: renewable energy, solar panels, nearly zero-energy buildings, energy			

SISUKORD

TÄHISED JA LÜHENDID	6
SISSEJUHATUS	7
1. PÄIKESEENERGEETIKA	9
1.1. Ülevaade	9
1.2. Päikeseenergeetika Eestis	10
1.3. Päikeseenergeetika potentsiaal	12
1.4. Päikeseenergeetika eelised	15
1.5. Päikeseenergeetika puudused	15
2. PÄIKESEPANEELID	17
2.1. Kristallilised paneelid	18
2.1.1. Monokristallilised paneelid	18
2.1.2. Polükristallilised paneelid	19
2.2. Õhukesekilelised päikesepaneelid	20
2.3. Päikesepaneelide elektrilised näitajad	21
2.3 BIPV ehk ehitisintegreeritud päikesepaneelid	22
2.3.1. Päikesepaneelid fassaadikattematerjalina	24
2.4 Paigaldusviisid	26
2.5 Päikesepaneelide hinnadünaamika	28
3. LIGINULLENERGIAHOONE	30
4. PÄIKESEENERGIA SÜSTEEMID	31
4.1. Võrguga ühendatud süsteem	31
4.2. Võrguühenduseta süsteem	32
5. PV süsteemi planeerimine	34
5.2. PV*SOL	34
5.3. Kiirgushulgad	35
5.4. Päikesepaneelide valik	36
6. Modelleeritud süsteem	38
6.1. Elamu energiatarve	39
6.2. Päikesepaneelide tootlikkus	40
6.3. Elektrienergia tootmise ja tarbimise ajaline kattuvus	45
6.4. Järeldused	48

KOKKUVÕTE	50
SUMMARY	53
KASUTATUD KIRJANDUS	56
LISAD	60
Lisa A. PV süsteemide tootlikkus	61
Lisa B. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta	63

TÄHISED JA LÜHENDID

BIPV	–	ehitisintegreeritud fotoelement (building integrated photovoltaic)
BAPV	–	ehitisele rakendatud fotoelement (building applied photovoltaic)
E	–	paneelile langev kiirgushulk W/m^2
$E_{diff,tilted}$	–	hajuskiirgus kaldpinnal W/m^2
$E_{dir,tilted}$	–	otsene kiirgus kaldpinnal W/m^2
$E_{G,tilted}$	–	kiirgushulk kaldpinnal W/m^2
$E_{refl,tilted}$	–	peegeldunud kiirgus W/m^2
E_{stc}	–	kiirgushulk standardtingimustes 1000 W/m^2
f_{Hay}	–	anisotroopia indeks
I_d	–	otsene kiirgus, W/m^2
I_{mpp}	–	vool maksimaalsel võimsusel A
I_{sc}	–	lühisahela vool A
mono-si	–	monokristalliline päikesepaneel (<i>mono crystalline solar panel</i>)
poly-si	–	polükristalliline päikesepaneel (<i>poly crystalline solar panel</i>)
PV	–	fotoelement (photovoltaic)
PVGis	–	Photovoltaic Geographical information system
T_{module}	–	mooduli temperatuur $^{\circ}\text{C}$
T_{amb}	–	välisõhu temperatuur $^{\circ}\text{C}$
U_{mpp}	–	pinge maksimaalsel võimsusel V
U_{oc}	–	avatud ahela pinge V
β	–	Päikesepaneelide nurk maapinna suhtes
θ	–	nurk päikesekiirte ja PV paneelide vahel
θ_z	–	päikese seniidinurk

SISSEJUHATUS

Seoses rahvastiku pideva kasvuga ja heaolu suurenemisega on kasvamas järjekindlalt ka ühiskonna nõudlus energia järele. Võttes arvesse tänapäeva maailma korraldust, siis on selge, et elu ilma elektrienergiata on raske ette kujutada. Seetõttu on seda pidevalt kasvavat nõudlust vaja rahuldada. Senimaani on inimkond suures osas toetunud mittetaastuvatele energiaallikatele ehk fossiilsete kütustele, kuid selline teguviis pole pikas perspektiivis jätkusuutlik. Jätkusuutlikkuse tagamiseks tuleb edaspidigi keskenduda taastuvale energiale põhinevate tehnoloogiate täiustamisele.

Tänapäeva ühiskond seisab silmitsi probleemidega, millele nii palju rõhku sadu aastaid tagasi veel ei pandud. Oleme teadvustamas, et sellisel moel jätkamine pole võimalik ning sellest tulenevalt pannakse üha enam rõhku taastuenergiaallikatele. Selliseid energiaallikaid on mitmeid ning kasutuses on olnud need juba pikemat aega, kuid kasutusviis ja tehnoloogia selle taga on olnud erinev, võrreldes tänapäevaga.

Üks selline energiaallikas on päike. Päikesest tulenevat energiat oleme samuti kasutanud juba varastel aegadel, kuid seda erinevatel eesmärkidel. Energia, mis päikeselt maale jõuab on sedavõrd suur, et teoreetiliselt oleks see piisav, et rahuldada kogu maailma energia vajadus. Sellest tulenevalt on välja töötatud tehnoloogiad nagu seda on päikesepaneelid, mille abil on võimalik päikeseenergia muundada elektrienergiaks ning seda tehnoloogiat on täiustatud alates sellest ajast peale, kui esimesed sellised elemendid loodi.

Seoses tehnoloogia pideva arenguga on suudetud välja töötada uudseid lahendusi ja samal ajal parandada olemasolevate tehnoloogiate efektiivsusnäitajaid. Koos tehnoloogia arenguga on suudetud parandada ka tootmisprotsesse, mis omakorda aitab kaasa selle turu kasvule. See kõik omakorda kajastub ka nende tehnoloogiate maksumuses, mis on lähiminevikus olnud pidevas languses. Tehnoloogia odavnemine ning efektiivsemaks muutmine teeb selle üha enam kättesaadavamaks ning atraktiivsemaks suurematele massidele.

Erinevatest direktiividest, hindade langusest ja efektiivsuste tõusmistest tulenevalt on taastuvenergia osakaal ülemaailmses energiaportfellis aastate jooksul pidevalt tõusnud. Eriti kiiresti on kasvanud just päikeseenergia osakaal ning tõenäoliselt see kasv ka jätkub, kuna tegemist on taastuvenergiaallika liigiga, mis on ülemaailmselt kättesaadav. Samuti peetakse päikeseenergiast elektri energia tootmist üheks konkurentsivõimelisemaks viisiks võrreldes tavapäraste meetmetega mitmel pool maailmas.

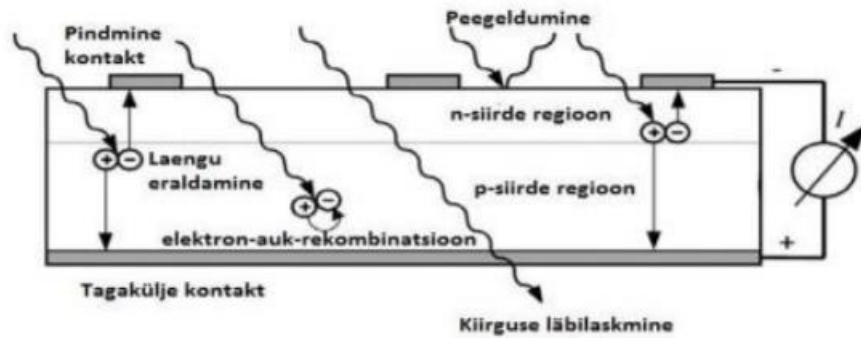
Magistritöö eesmärk on uurida probleeme seoses päikesepaneelidega ning nende eelistatud paigaldusviise tuginedes PV*SOL keskkonnas modelleeritud süsteemidele.

1. PÄIKESEENERGEETIKA

1.1. Ülevaade

Päikeseenergeetika all mõeldakse protsessi, kus päikeseenergiat kasutatakse, et toota elektrit või soojust. Päikeseenergia kasutamine jaguneb passiivseks ja aktiivseks. Passiivse päikeseenergia kasutamise puhul on tegemist selliste protsessidega nagu vee soojendamine, ruumide kütmine ja valgustamine. Aktiivsete päikeseenergia süsteemide puhul on tegemist süsteemidega, kus päikeseenergiat kasutatakse mingi muu seadme vahendusel. Aktiivsed süsteemid on näiteks päikesekollektorid, mis võimaldavad soojendada vett [1]. Selliste süsteemide puhul kasutatakse tumedapinnalisi päikesepaneele, kust läbi voolav soojuskandja kannab soojuse akumulatsioonipaaki, mida on võimalik kasutada sooja tarbevee saamiseks või hoone kütmiseks [2].

Päikesekollektor leiutati aastal 1767 ning esimesed eeldused selleks, et saada päikeseenergiast elektrienergiat loodi aastal 1839, kui avastati fotoelektriline efekt [1]. Päikeseelemendi puhul on tegemist pooljuht p-n siirde fotodiodiga, mis valguse neeldumisel on võimeline välja andma elektrilist võimsust. Päikesekiirguse energia on sedavõrd tugev, et see suudab üksikud laengukandjad neid kinni hoidvast tuumast lahti lüüa. Siirde elektriväli eraldab seejärel tekkinud elektronid ning augud nii, et elektronid jäävad püsima n-siirde piirkonda ning augud kogunevad omakorda p-kihti. Selle tulemusena tekib diodi viikude vahel potentsiaalide vahe ehk elektromotoorjõud. Samuti on pooljuhid ühendatud omavahel kontaktidega, mille tulemusena tekib kinnine vooluring, mida on võimalik kasutada (joonis 1) [3].



Joonis 1.1. Fotoelektriline efekt [3].

Päikesepaneelid koosnevad fotoelektrilistest elementidest, mis on omavahel kokku ühendatud, et saada seade, mis on võimeline tootma alalisvoolu. Elementide kokku liitmis vajadus tuleneb sellest, kuna ühe eraldiseisva elemendi pinge pole piisav [3].

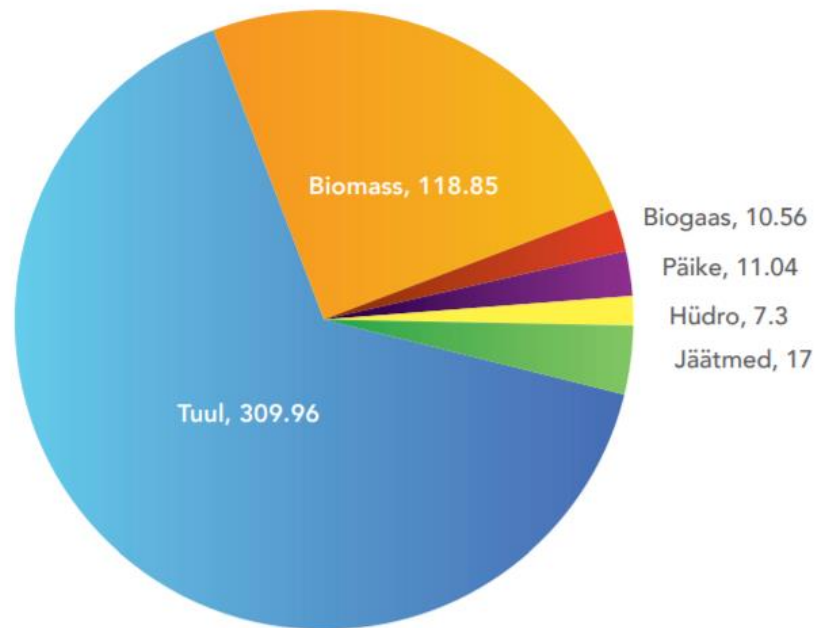
Tänapäeval kõige laialdasemat kasutust leidv räni-päikesepaneel valmistati esimest korda aastal 1956 [1]. Sellest ajast saati on seda tehnoloogiat edasi arendatud ning koos sellega on see muutunud tavakodanikele üha enam kättesaadavamaks. Tänu pidevale arengule ja täiustamisele peetakse päikeseenergiast elektri energia tootmist üheks konkruentsivõimeliseimaks meetodiks ja heaks alternatiiviks fossiilkütustele põhinevale energeetikale paljudes kohtades üle maailma.

1.2. Päikeseenergeetika Eestis

Taastuvenergia osakaal on Eestis aastate jooksul kasvanud. Aastal 2004 oli taastuvenergia osakaal energia lõpptarbimises 18,4% ning aastaks 2016 oli see number tõusnud 28,6% peale. Elektrienergiat toodeti 2016 aastal taastuvatest allikatest võrku 1414 GWh [4].

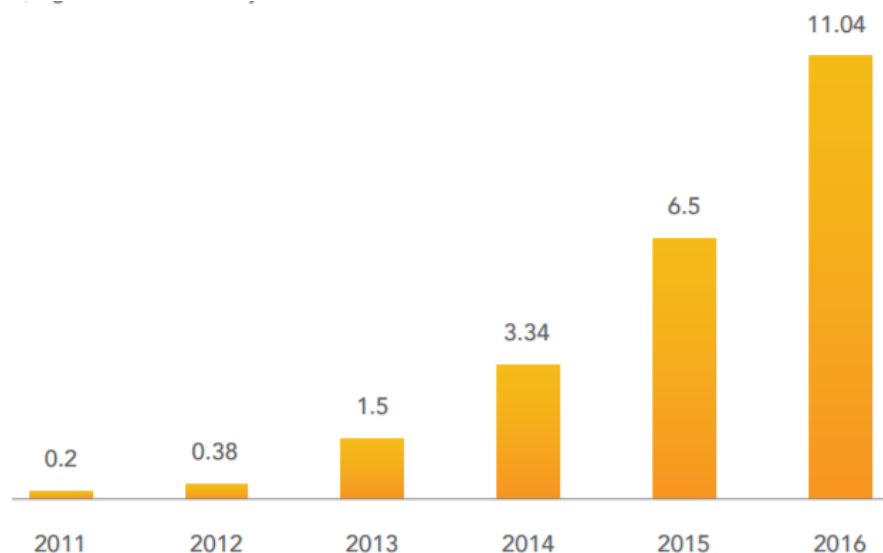
Võrreldes aastaga 2015 kasvas aastal 2016 toodetud elektrienergia maht päikeseenergiast kahekordseks, jõudes peaaegu 3 GWh-ni. Samal aastal lisandus uusi päikeseenergia tootimisvõimalusi võrku 3,74 MW, mis on varasema aastaga 16% enam ning rohkem kui aastatel 2011-2014 kokku. Päikeseelektri tootjaid lisandus 250. Võrreldes varasemaga on kasvanud ka üle 200 kW võimsusega päikesepeakide ning autonoomsete

päikeseelektrijaamade arv, mis on tingitud osaliselt Elektrilevi *off-grid* jaamade rajamisest [4].



Joonis 1.2. Taastuvenergia tootmisvõimsused elektritootmisviiside lõikes, MW [4].

Jooniselt 1.2 on näha, et 2016 aasta seisuga suurima osa taastuvenergia installeeritud võimsustest moodustab tuuleenergia - 309,96 MW. Tuuleenergiale järgneb biomass - 118,85 MW. Päikeseenergia koguvõimsus tegi aastatel 2015-2016 kiire kasvu ning edestas sellega biogaasi installeeritud võimsuse ja paikneb kolmandal kohal [4].



Joonis 1.3. Päikeseenergia võimsused kokku, MW [4].

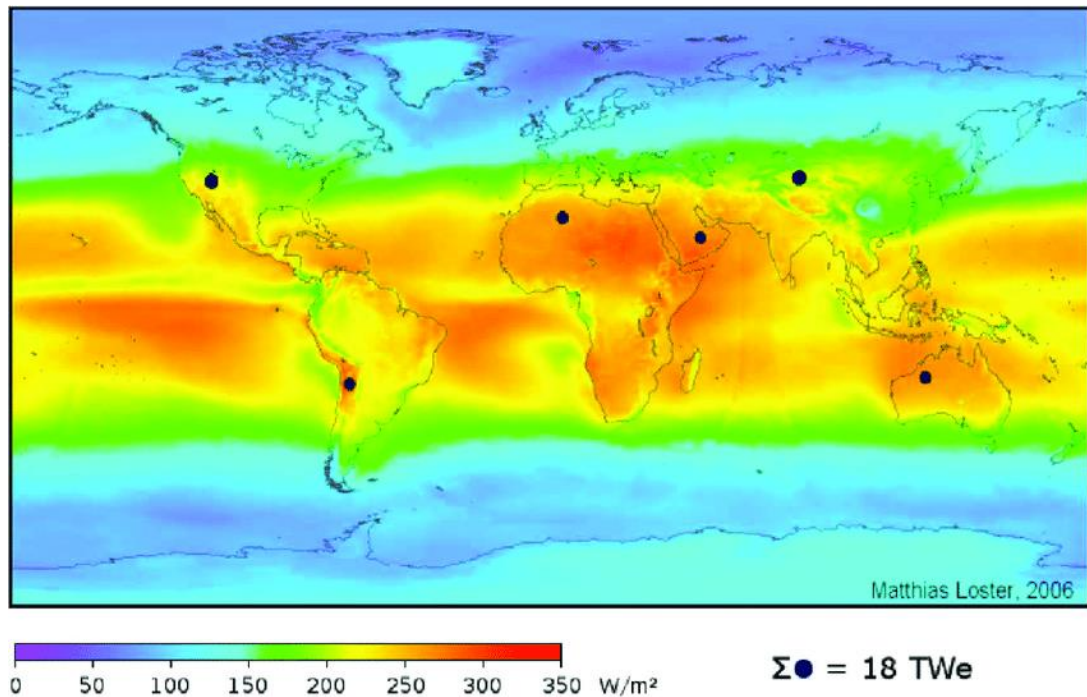
Jooniselt 1.3 on näha päikeseenergia võimsused aastatel 2011-2016. Aastate jooksul on see arv pidevalt kasvanud ning vahemikus 2013-2016 praktiliselt iga aastaga kahekordistunud. Aastal 2016 toodeti võrku 3 GWh elektrit, mis on kaks korda rohkem, kui aastal 2015. Eeldatavasti on aga päiksepaneelide tegelik toodang suurem, kuna pole täpseid andmeid majapidamiste ja ettevõtete omatarbimise kohta, mille võrra võrku antav elektrienergia kogus on väiksem [4].

Võrreldes Eesti PV-installatsioonide koguvõimsust teiste Euroopa Liidu riikidega nagu Saksamaa, Itaalia ja Prantsusmaa, on Eesti koguvõimsus siiski marginaalne. Potentsiaal on aga tunduvalt suurem, kuna aastane päikeseenergia hulk on võrreldav Põhja-Prantsusmaaga.

1.3. Päikeseenergeetika potentsiaal

Päikese puhul on tegemist energiaallikaga, mis teoreetiliselt suudaks rahuldada kogu maailma energia vajadused. Aastas jõuab maale ligi $4 \cdot 10^6$ EJ päikeseenergiat, millest väidetavalt 50000 EJ oleks võimalik reaalselt ka ära kasutada. Vaatamata sellele suurele potentsiaalile ning teadlikuse kasvule, on endiselt päikeseenergia osakaal ülemaailmses energiavarustuses küllaltki väike [5].

Võrreldes omavahel tehnoloogiad, nagu näiteks maasoojusenergia, biomass ja päikeseenergia, siis kõige suuremat potentsiaali omab päikeseenergia [5]. Seda tänu sellele, et päikeseenergia on kättesaadav igalpool. Küll aga erinevad kiirgushulgad, mis jõuavad maailma erinevatesse osadesse. Kiirgushulkade jagunemine on kujutatud joonisel 1.4.



Joonis 1.4. Päikese kiirgustiheduse jagunemine [5].

Keskmiselt jõuab maa atmosfääri 342 W/m^2 päikeseenergiat, millest umbes 30% peegeldub tagasi kosmosesse või on hajutatud. Seega on võimalik ära kasutada ligikaudu 70% saabuvast päikeseenergiast ehk 239 W/m^2 . Joonisel 1.3 musta täpiga märgitud piirkondade potentsiaal on seda võrd suur, et 8% suuruse efektiivsuse juures oleks võimalik rahuldada kogu maailma primaarenergia vajadus ja rohkemgi veel. Sellest tulenevalt nähtakse ka vaeva, et antud tehnoloogiat täiustada ning selle osakaalu tõsta. Tabelis 1.1 on väljatoodud erinevate taastuvenergiaallikate võimsuste muutused lähiminevikus [5].

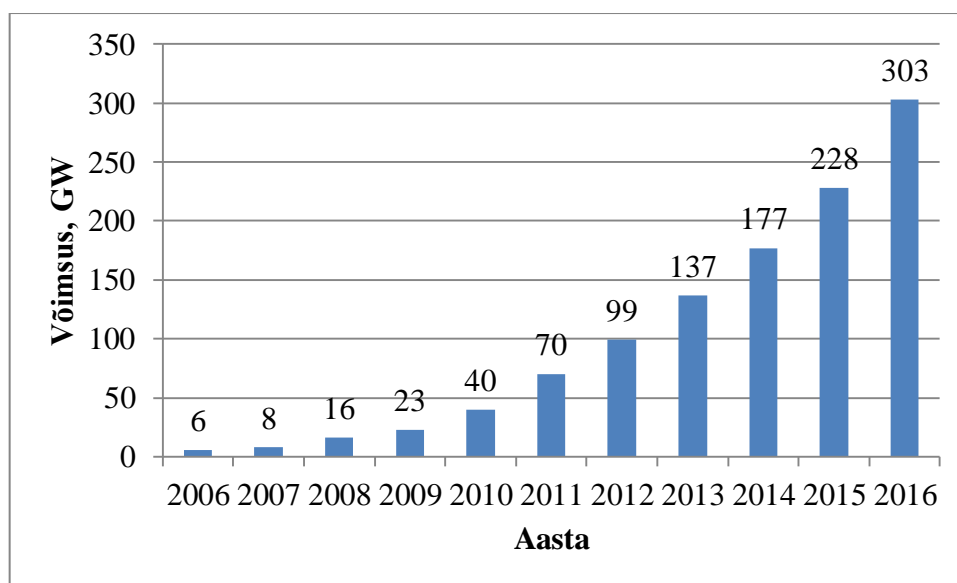
Tabel 1.1. Taastuvenergiaallikate liikide koguvõimsused aasatel 2013-2016 GW'des [6]

Taastuvenergiaallika liik	Aasta			
	2013	2014	2015	2016
1	2	3	4	5
Taastuvenergiaallikate koguvõimsus	1578	1712	1849	2017
hüdroenergia	1018	1055	1064	1096

Tabel 1.1. järg

1	2	3	4	5
Bio-energia	88	93	106	112
maasoojus	12,1	12,8	13,2	13,5
päikeseenergia	138	177	227	303
tuuleenergia	319	370	433	487

Tabelist 1.1 on näha, et taastuvenergiaallikate liikide koguvõimsused on aastate jooksul stabiilselt kasvanud. Sealjuures on kõige enam tõusnud tuule- ja päikeseenergeetika võimsused.



Joonis 1.5. Päikeseenergia võimsused 2006-2016 [6].

Jooniselt 1.5 on näha, et päikeseenergia võimsused on kasvanud väga kiiresti. Kui aastal 2006 oli koguvõimsus veel 6 GW, siis aastaks 2016 on see arv kasvanud juba 303 GW'ni. Võrreldes erinevate taastuvenergiaallikate võimsuste kasvu aastatel 2015-2016, kasvas enim päikeseenergia. Aastal 2016 kasvas aastane päikeseenergia turg 50%, ehk 75 GW, mis tõstis ülemaailmse kogumäära 303 GW-ni. Suurim panus, täpsemalt 85%, oli siin riikidel, kes on maailmas esirinnas päikeseelektri kasutamises nagu näiteks Hiina, Saksamaa ja Jaapan [7].

1.4. Päikeseenergeetika eelised

Üks oluliseimaid eeliseid seoses päikeseenergiaga on see, et tegemist on keskkonnasäästliku taastuva energiaallikaga. Päikeseenergia kasutamise tulemusel väheneb fossiilsete kütuste põletamine energia saamiseks [8].

Päikesepaneelid on vastupidavad ning aja möödudes kaotavad väga vähe oma võimsusest – 25 aasta jooksul kaotavad päikesepaneelid üldiselt 15-20% oma algsest tootlikkusest. Samuti on päikesepaneelidel võrdlemisi madalad hoolduskulud [8].

Päikesepaneelide kasutamist nähakse kui ühte kõige kulutõhusamat meetodit, et hoonest saaks liginullenergiahoone või isegi plussenergiahoone.

Päikeseenergia kasutamine ei ole kuidagi geograafiliselt piiratud, kuna päikeseenergia on kättesaadav üle maailma. Hea näide on siin kohal Saksamaa, kes on maailmas üks suurimaid päikeseenergia kasutajaid [7].

Päikeseenergiat on võimalik kasutada erinevatel eesmärkidel. Kasutades päikesepaneele on võimalik päikeseenergia muundada elektrienergiaks ning päikesekollektorite abil soojuseks. Tänu päikeseenergia kättesaadavusele on selle abil võimalik toota elektrit piirkondades, kus puudub ligipääs elektrivõrgule, destilleerida vett piirkondades, kus on piiratud koguses puhast joogivett ning varustada elektriga sateliite kosmoses [9].

1.5. Päikesenergeetika puudused

Päikesenergeetika vajab suuri esialgseid investeeringuid, kuid see probleem võib tulevikus liikuda paremuse suunas. Tänu päikeseenergiaga seotud tehnoloogia pideva arenguga on hinnad languses [9].

Energiat on võimalik toota ka pilvise ja vihmaste ilmadega, kuid sellisel juhul on tootlikkus madalam. Suure osa energiast saab toota päevavalguse olemasolul. Samuti sõltub tootlikkus palju aastaegadest. Talvekuudel on tootlikkus tunduvalt madalam, mis on tingitud vähesest valgust ajast [9].

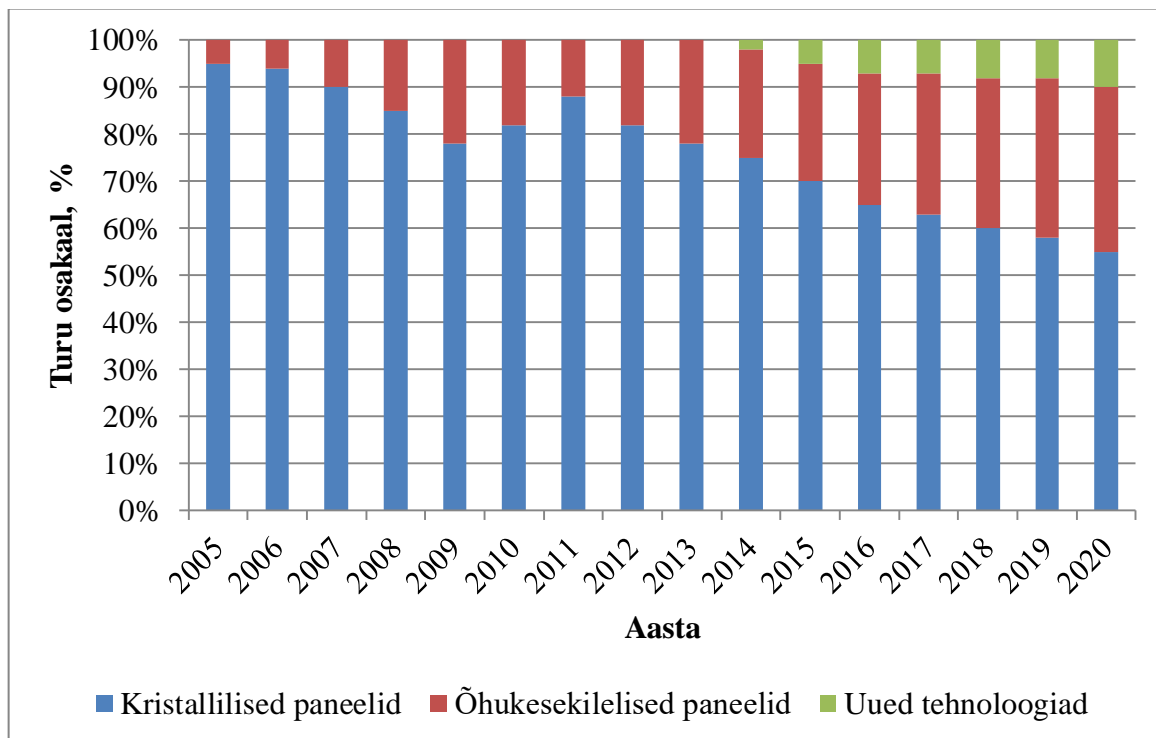
Olemasolev tehnoloogia pole veel piisavalt efektiivne. Parimatel juhtudel suudetakse umbes viiendik päikeseenergiast muundada elektrienergiaks. Üldiselt jäävad kasutegurid vahemikku 5-20% [8].

Vaatamata sellele, et tegemist on keskkonnasäästliku taastuenergiaga, siis fotoelementide tootmisprotsessil kasutatakse siiski keskkonnale ohtlike materjale, mille tulemusel paisatakse õhku kasvuhoonegaase [8].

Suurema hulga elektri tootmiseks on vaja rohkem paneele, mis omakorda tähendab seda, et on vaja suurema pindalaga ala, kuhu päike ligi pääseb. Oluline on siin kohal jälgida võimsustihedust, mis näitab, kui palju on võimalik mingi energiaallika abil toota elektrit ruutmeetri kohta. Madal võimsustegur näitab seda, et vaja on liiga palju maa ala, et saada soovitud kogust elektrit. Päikeseenergia puhul on keskmiseks võimsustiheduseks 170 W/m^2 , mis on suurem, kui ühelgi teisel taastuenergiaallikal [10].

2. PÄIKESEPAANEELID

Fotoelemente liigitatakse vastavalt nende tootmistehnoloogiate järgi reeglina kaheks: kristalliline räni ja õhukesekilelised elemendid. Tehnoloogiad erinevad teineteisest peale nende tootmistehnoloogiate peamiselt hinna, efektiivsuse ja temperatuurikoefitsendi poolest. Praeguse seisuga on valdav osa installeeritud päikesepaneelidest kristallilise räni baasil (ligi 80%), mis on tingitud nende paremast efektiivsustegurist. Ülejäänud osa moodustavad õhukesekilelised, kuhu kuuluvad amorfne räni, vaskindiumgalliumseleniit, kaadiumtelluriit ja orgaanilised fotogalvaanilised elemendid. Tingitud sellest, et õhukesekilelised päikesepaneelid on odavamad ja arvestades, et tehnoloogia arenguga suudetakse nende elementide efektiivsust tõsta, siis võib oodata õhukesekileliste päikesepaneelide turusookaalu suurenemist [11].



Joonis 2.1. Erinevate päikesepaneelide tehnoloogiate olukord maailmaturul [12].

Jooniselt 2.1 on näha, et kui aastal 2005 oli veel õhukesekileliste päikesepaneelide turuoskaal alla 10%, siis aastaks 2020 prognoositakse nende osakaaluks juba umbes 30%.

2.1. Kristallilised paneelid

Kristalliliste paneelide puhul on võrreldes teiste tehnoloogiatega tegemist efektiivsemate, kuid samas ka kallimate paneelidega. Kristalsed paneelid jagunevad mono- ja polükristall paneelideks [13].

2.1.1. Monokristallilised paneelid

Monokristalliliste päikesepaneelide tootmine on kulukas, kuna paneelis kasutatakse kristallilist räni, mis on esmalt toodetud suurte tahvlitena. Seejärel lõigatakse tahvlid parajateks suurusteks ja metallribadest elektrijuhid asetatakse elemendi peale, mille abil kogutakse elemendist vabanevad elektronid. Monokristallilistel päikesepaneelidel on hetkeseisuga parim kasutegur, suutes muundada 14-20% saabuvast päikeseenergiast elektrienergiaks. Eeldatakse, et aastaks 2020 suudetakse tänu tehnoloogia arengule see number tõsta 23% peale ja pikemas perspektiivis 25% peale [14]. Tingitud sellest, et neil on kõrgeim efektiivsus tegur võrreldes teiste tehnoloogiatega, on nende võimsustihedus kõige parem, mistõttu on need kõige otstarbekamad, kui paigalduspind on limiteeritud. Samas on aga monokristallilised paneelid tundlikumad temperatuuride suhtes. Kõrgematel temperatuuridel langeb nende tootlikkus kõige rohkem [15].

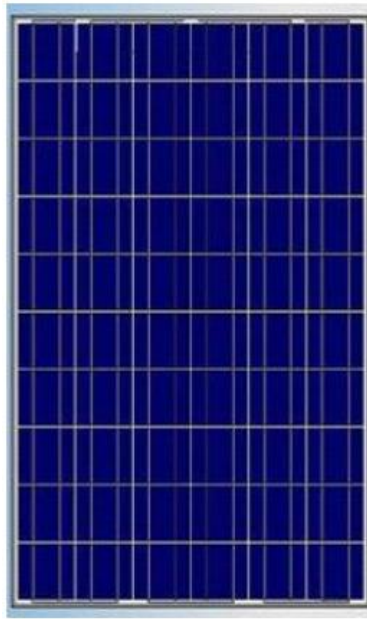


Joonis 2.2. Monokristalne PV paneel [16].

Monokristalsetele päikesepaneelidele on omane nende must värvus ning hästi eristatav elementide kuju nagu seda on näha joonisel 2.2.

2.1.2. Polükristallilised paneelid

Polükristalliliste päikesepaneelide aatomi struktuur on ebakorrapärasem, millest tingituna on nende efektiivsus tegur madalam. Samas on seda tüüpi paneelid odavamad, kuna nende tootmisprotsess on lihtsam võrreldes monokristalliliste paneelidega ja vastupidavamad päikeselt tuleneva kiirituse suhtes. Tänu sellele, et nad on vastupidavamad temperatuuri ja kiirituse suhtes, suudavad nad kõrgematel temperatuuridel toota rohkem, kui monokristallilised paneelid [14].

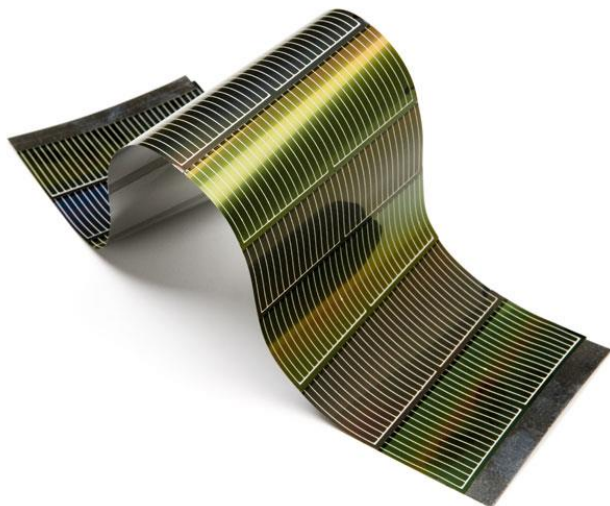


Joonis 2.3. Polükristalne PV paneel [17].

Jälgides praeguseid trende ja tehnoloogiate arengut, siis eeldatakse, et kristalsed paneelid jäävad turgu domineerima vähemalt kuni aastani 2020. See on tingitud nende pikast elueast, piisava ressursi olemasolust ja sellest, et kristalsete paneelide tehnoloogia on end juba tõestanud ning on usaldusväärne [14].

2.2. Õhukesekilelised päikesepaneelid

Õhukesekilelistel päikestepaneelidel puudub kristalne struktuur ning nende valmistamisel asetatakse õhukene valgustundlik kile mõnele odavamale materjalile nagu klaas, roostevaba teras või plastik. Amorfsest ränist valmistatud paneelid suudavad valgust paremini neelata, mistõttu need saavad olla õhemad. Õhukesekileliste päikesepaneelide eelised võrreldes teiste tehnoloogiatega on nende võrdlemisi madal toormaterjali kulu, kõrge automatiseeritus ja tootmis efektiivsus, hõlpsasti integreeritav ehitistega ning parema väljanägemisega ja hea tootlikkus kõrgematel temperatuuridel. Samas on seda tüüpi päikesepaneelidel kõige väiksem efektiivsus võrreldes teiste tehnoloogiatega. Otsustades õhukesekileliste päikesepaneelide kasuks tuleb arvestada, et saavutada sama tootmisvõimsust, mis kristalsetega, on vaja pea kaks korda rohkem vaba pinda [14, 15].



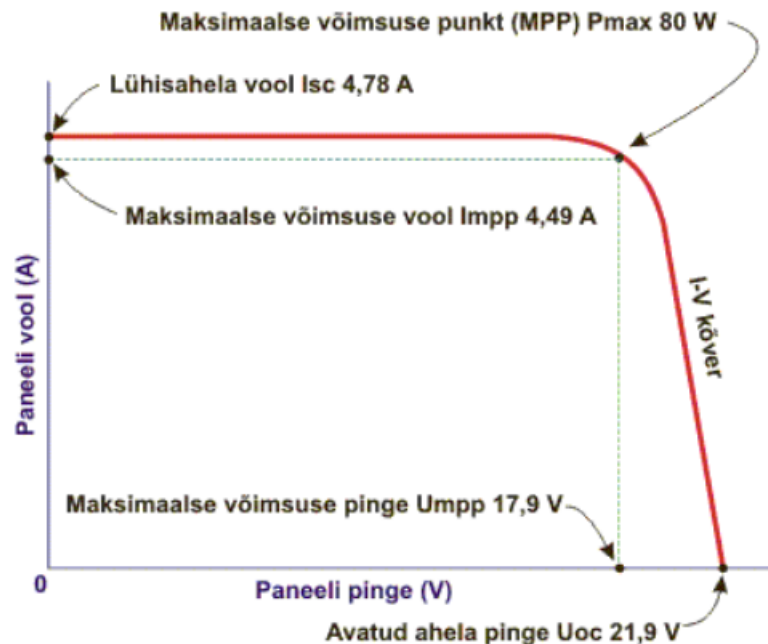
Joonis 2.4. Õhukesekeiline päikesepaneel [18].

CdTe ehk kaadmiumtellurit õhukesekeeliste paneelide tootmisprotsess on võrdlemisi lihtne, millest tulenevalt on nende tootmiskulud väiksemad. Samuti on nende tootmisel kuluva energia tasuvusaeg kõige väiksem võrreldes teiste tehnoloogiatega – 8 kuud. CiGs ehk vaskindumgalliumseleniit paneelide tootmisprotsess on keerukam, mistõttu on ka tootmiskulud suuremad. Hetkel domineerivad õhukesekeeliste paneelide turgu CdTe tüüpi lahendused, omades sealjuures ka parimat võimsuseühiku suhet. Antud lahenduste probleemiks on aga see, et nende materjalid pole nii külluslikud, kui seda on räni ja samuti on tegemist mürgiste ühenditega [14].

2.3. Päikesepaneelide elektrilised näitajad

Päikesepaneelide elektriliste parameetrite iseloomustamiseks kasutatakse pinge-voolu kõverat. Reeglina on PV paneelide tehnilistes andmetes välja toodud ka sellised näitajad nagu U_{oc} , I_{sc} , U_{mpp} ja I_{mpp} , mis on siis vastavalt avatud ahela pinge, lühisvool ning pinge – ja vool maksimaalsel võimsusel. Avatud ahela pinge on olukord, kus päikesepaneelile pole ühendatud koormust ning selle tulemusena on voolutugevus null ja pinge maksimaalne. Teine ekstreemsus on see, kui takistuse väärtus on null, mille tulemusel kasvab vool oma maksimumväärtuseni ehk lühisvooluks. Sellistes olukordades, kus eksisteerib avatud ahela pinge või lühisvool, on PV elemendi väljundvõimsus null. Päikesepaneelide pinge ja vool

on sõltuvad temperatuurist ja kiirgushulgast. Paneeli temperatuuri langemisega kasvab pinge ning mida rohkem päikese kiirgust jõuab paneelile, seda suurem on vool [19].



Joonis 2.5. Päikesepaneeli volt-amper karakteristik [20].

Joonisel 2.5 on kujutatud 80 W päikesepaneeli volt-amper karakteristik. Antud paneeli maksimaalse võimsuse punkti saavutamise (MPP) hetkel on maksimaalse võimsuse pinge ehk U_{mpp} väärtuseks 17,9 V ning maksimaalse võimsuse voolu ehk I_{mpp} väärtuseks 4,49 A.

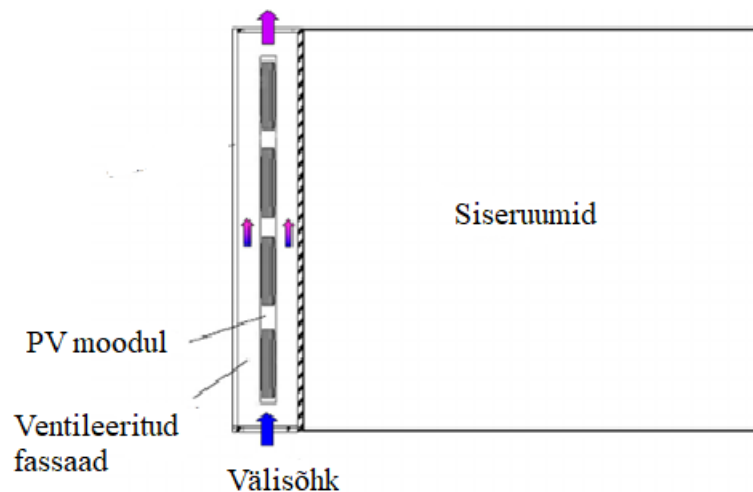
Tingitud sellest, et reaalses olukorras ilmastiku olud pidevalt muutuvad ning päikesepaneeli karakteristikud on nendest sõltuvad, siis kasutatakse ka *maximum power point tracking*’ut. Tegemist on seadega, mis reaalsele oludele vastavalt reguleerib PV elemendi karakteristikuid, et need töötaksid võimalikult palju oma maksimaalse võimsuse punkti juures [20].

2.3 BIPV ehk ehitisintegreeritud päikesepaneelid

Erinevalt BAPV ehk paneelidest, mis on kinnitatud hoone fassaadile, katusele või mõnele muule elemendile, on BIPV puhul tegemist lahendusega, kus päikesepaneelid on osa hoone ehituslikus struktuurist. Sellise lahenduse juures ei ole päikesepaneelid enam ainult elektrit

tootev element vaid vastavalt olukorrale täidab ka samu ülesandeid, mis tavamaterjalid fassaadil või katusel. Tegemist pole siiski uudse lahendusega, kuna päikesepaneelide integreerimist hoonete fassaadidesse on uuritud juba sellest ajast peale, kui esimesed PV moodulid loodi [21].

Euroopa Liidu energiatõhusus direktiivi nõuetest tulenevalt ja tingitud asjaolust, et ehitussektor on üks suurimaid energia tarbijaid, on vaja võimalikult maksimaalselt ära kasutada nii päikesest tulenevat kui ka teistest taastuvenergiaallikatest saadav energia. Nõutud energiatõhusus arvu saavutamiseks on ehitisintegreeritud päikesepaneelid parem lahendus, kui seda on tuuleturbiinid, kuna neid on lihtsam ja odavam paigaldada, samuti on tegemist atraktiivsema lahendusega [22].



Joonis 2.5. BIPV süsteemi põhimõtteskeem [23].

Joonisel 2.5 on kujutatud BIPV süsteemi põhimõtteskeem, mis on paigaldatud hoone fassaadi. Antud lahenduse puhul siseneb välisõhk altpoolt ning lahkub ülevalt. Selle protsessi käigus alanevad PV moodulite temperatuurid, mis omakorda parandab nende efektiivsust ning tagab pikema eluea. Võimalus on lisada juurde õhukanal koos ventilaatoriga, mille abil saab suunata selle sooja õhu siseruumidesse ning selle tulemusel on võimalik külmematel perioodidel vähendada hoone küttekoormust [23].

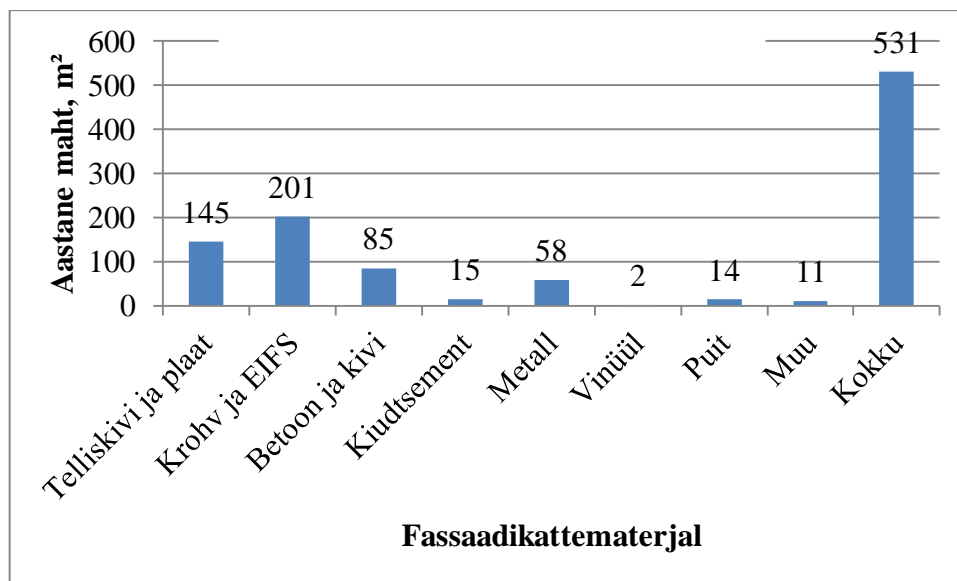
Integreerides päikesepaneeli hoonete fassaadidesse tuleb silmas pidada seda, et suure tõenäosusega jääb mingi osa sellest varjude taha. Olenevalt paneeli tüübist toob see omaga kaasa väiksema või suurema võimsuse kao. Isegi osaliselt varju taha jääv kristall-räni moodul toob endaga kaasa suure võimsuse kao. Seda probleemi aitavad leevendada

mikroinverterid, mis ühendatakse eraldi igale moodulile või otsustades õhukesekileliste päikesepaneelide kasuks, mis pole nii mõjutatavad varjudest. Paigaldades kristall-räni mooduleid vertikaalsele pinnale väheneb nende tootlikkus 20-40%, sõltuvalt asukohast [22].

Katuseid peetakse parimaks kohaks, kus rakendada BIPV süsteeme, kuna päikesepaneelid on kõige suurema tootlikusega olles paigaldatud maapinna suhtes teatud nurga all, mida suur osa katuseid ka on. Sellise süsteemi puhul asendatakse enamlevinud katusematerjalid päikesepaneelidega ning selle tulemusena on võimalik saavutada lahendus, mis täidab ülesandeid, mida üks tavaline katus ja millele lisaks on võimalik toota ka elektrit. Hetkel domineerivad ka sellise lahenduse juures pigem kristall-räni moodulid, kuid rakendust leiavad ka õhukesekilelised paneelid ja seda just olukordades, kus paneelid jäävad olude sunnil osaliselt varjustatuks, mis kristall-räni moodulite puhul tähendab väga suurt efektiivsuse langust [22].

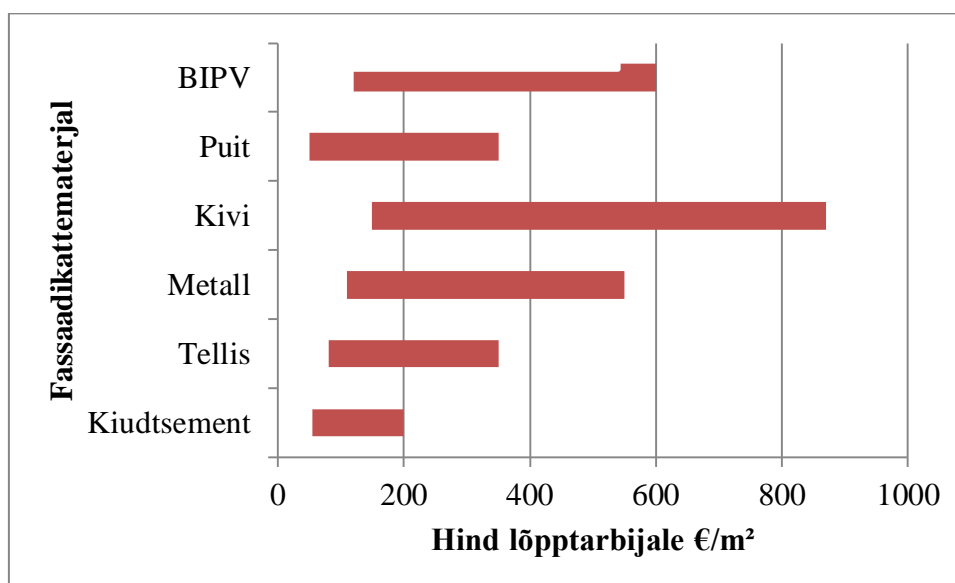
2.3.1. Päikesepaneelid fassaadikattematerjalina

Tänapäeval on saadaval väga palju erinevaid fassaadikattematerjale, odavamaid ja kallamaid. Hinnad võivad varieeruda 30 eurost ruutmeetri kohta (näiteks kiudtsement) kuni 1100 euron ruutmeetri kohta (*curtain wall*). Samamoodi võib leida hinna suhtes erinevaid lahendusi päikesepaneelide juures kasutades neid fassaadikattematerjalina. Hinnad algavad 130 €/m² juures, kasutades madala efektiivsusega õhukesekihilisi päikesepaneele ja küündivad 750 €/m² kõrgekvaliteediliste süsteemide puhul [24].



Joonis 2.6. Fassaadikattematerjalide jagunemine euroopas aastal 2014 [24].

Jooniselt 2.6 on näha, et fassaadikattematerjali turu suurus aastal 2014 Euroopas oli 531 miljonit m². See arv näitab potentsiaalset pinda, mida oleks võimalik ära kasutada, et toota päikeseenergiast elektrit.



Joonis 2.7. Fassaadikattematerjalide hinnad lõpptarbijale, €/m² [24].

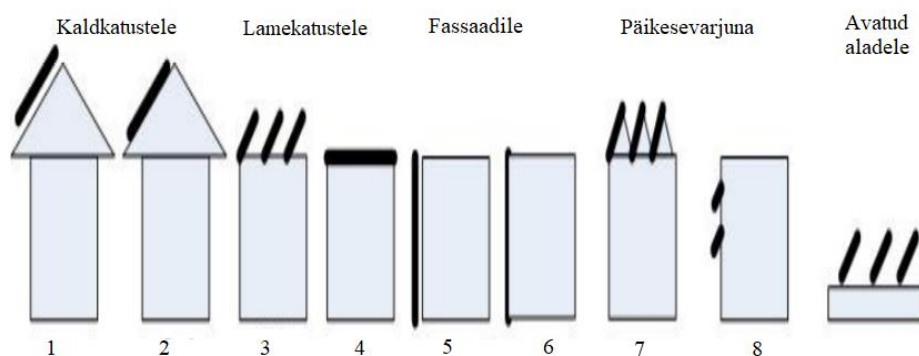
Joonisel 2.7 on välja toodud võrdluseks enamlevinute fassaadikattematerjalide ja integreeritud päikesepaneelide hinnad lõpptarbijale. On näha, et tavaliste fassaadide ja integreeritud päikesepaneelidega fassaadide hinnad ei erine enam väga palju, mis on tingitud pidevast tehnoloogia arengust ja hindade langusest. Siin tuleb silmas pidada ka

seda, et tavaliste materjalide puhul on nende tasuvus null. Arvestades, et päikesepaneelide eluiga on umbes 30 aastat, siis suure tõenäosusega tasub see algne suurem investeering end ära.

2.4 Paigaldusviisid

Päikesepaneelide võimalike paigaldusviise on mitmeid. Olenevalt olukorrast ja võimalustest tuleb valida kõige optimaalsem lahendus. Juhul, kui on olemas piisavalt vaba kasutamata maa-ala, siis on võimalik seda pinda ära kasutada, paigutades paneelid maapinnale optimaalse nurga alla. Suurim eelis sellise lahenduse juures on see, et paneelid saab paigutada just sellise nurga all, kus nende tootlikkus on kõige suurem. Maale paigaldatud installatsioonide korral on tagatud ligipääs paneelidele, et teostada hooldustöid jms. Samuti on võimalik maapinnale ehitada süsteem, mis jälgib automaatselt päikese suunda. Maapinnale paigaldades on vaja ehitada ka kandekonstruktsioon, mis omakorda tähendab täiendavaid kulusid [25].

Suurem tõenäosus on aga see, et sellist piisava suurusega vaba pinda enamustel inimestel ei ole ning sellisel juhul on võimalik paigutada paneele oma hoonete kandvatele elementidele või võimaluse korral integreerida päikesepaneele hoone struktuuri.



Joonis 2.6. Päikesepaneelide võimalikud paigaldusviisid [26].

Joonisel 2.6 on kujutatud päikesepaneelide erinevad paigaldusviisid. Hoone tüübist ning võimalustest sõltuvalt on võimalik päikesepaneele paigaldada erinevatel viisidel. Kaldkatuse puhul on paneele võimalik paigaldada nii olemasoleva katuse peale kui ka

integreerida katusekattega. Olemasoleva katuse peale paneele paigaldades tuleb tagada tuleohutus, mis saavutatakse paneelide isoleerimisega katusest. Jättes katuse ja paneelide vahele vähemalt 10 cm vahe, tagatakse paneelide õhutamine, millega omakorda minimeeritakse kuumenemisest tingitud kadusid. Integreerides päikesepaneel katusekattega peavad paneelid tagama ka ilmastikukindluse, mille tulemusena kasvab ka konstruktsiooni maksumus. Kaldkatused on üldiselt juba sellise nurga all, millega tagatakse kõrgem tootlikkus. [25].

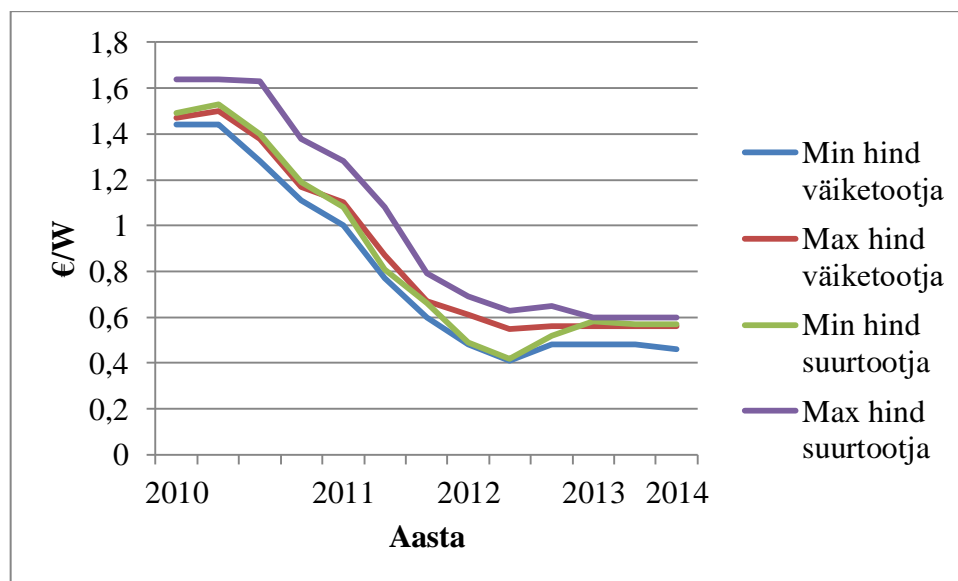
Lamekatuse puhul on samuti võimalik päikesepaneel integreerida katusekattega. Tootlikkust silmas pidades on parem lahendus paigaldada paneel lamekatusele nagu on kujutatud joonisel 2.6 numbriga 3. Sellise lahenduse puhul on vajalik kasutada ankruid, mis hoiavad paneel katusepinnal. Paneelide kaldenurk on 18-25°, et vältida tuulest tekkivat ohtu. Väikse kalde korral võib hakata probleeme tekitama kuhjuv lumi. Juhul, kui katuse täiendav katusevõime on umbes 100 kg/m², siis on võimalik paigaldada ka massiivsemaid kandekonstruktsioone. Arvestades Eesti linnade pilti, siis võib öelda, et kõige suurem potentsiaal sellistel lahendustel on linnades, kuna valdaval osal hoonetel on lamekatused. Samas on ka sellistel katustel reeglina palju varje tekitavaid objekte, mis piiravad kasutatavat ala [25].

Samuti on päikesepaneel võimalik paigaldada ka hoone fassaadile nagu on kujutatud joonisel 2.6 numbriga 5 ja 6. Paigaldades päikesepaneel fassaadile tuleb arvestada efektiivsuse kadudega, mis jäävad vahemikku 20-40% olenevalt asukohast. Fassaadidele paigaldatud paneelide eelis võrreldes katusele paigaldatud paneelidega seisneb selles, et lumel pole võimalik kuhjuda. Otsustades sellise lahenduse kasuks, oleks mõistlik kasutada paneel kui fassaadielemendina eriti juhul, kui katmisel jääks paneelide taha väärtuslik fassaadikattematerjal [25].

Praktiliselt on võimalik ära kasutada kõiki hoone elemente. Paigaldades päikesepaneel aknaid varjutavale sirmile, täidavad nad oma põhiülesande, milleks on elektritootmine, lisaks veel ühte ülesannet, milleks on päikese valgushulga vähendamine. Seega tuleb hoone planeerimisel juba arvestada erinevate lahendustega, et muuta päikesepaneelide kasutamine tõhusamaks [25].

2.5 Päikesepaneelide hinnadünaamika

Fotogalvaaniliste elementide tootmismahud on jõudsalt kasvanud, millele on kaasa aidanud tootmistehnoloogia areng. Hetkel on suur osa installeeritud päikesepaneelidest valmistatud kristallilise räni baasil [10]. Kristallilise räni moodulite areng peegeldub ka nende tootmishinnas. Hinnad on jõudsalt langenud ning see trend jätkub siamaani. Joonisel 1 on väljatoodud kristallilise räni moodulite hinnadünaamika võimsusühiku kohta aastatel 2010-2014.



Joonis 1. Kristall-räni moodulite hinnadünaamika aastatel 2010-2014 [27].

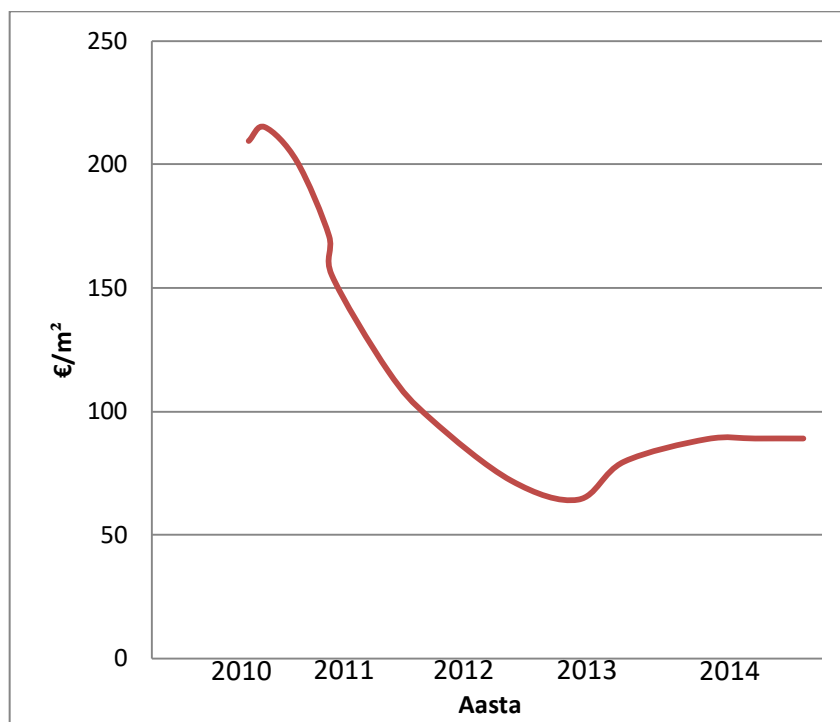
Jooniselt 1 on näha, et hind on langenud vahemikul 2010-2014 peaaegu 3 korda. Kui aastal 2010 oli hind veel umbes 1,49 eur/W_p, siis aastaks 2014 oli see langenud 0,57 eur/W_p.

Tehnoloogia arenguga on suudetud päikesepaneelide efektiivsust ja võimsust pindalaühiku kohta tõsta ja sealjuures nende hinda langetada. Tabelis 1 on välja toodud päikesepaneelide keskmised võimsused perioodil 2010-2014.

Tabel 2.1. Standardmõõdus (1,6 m²) päikesepaneelide keskmised võimsused aastatel 2010-2014 [27]

Aasta	Võimsus, W	Võimsus 1 m ² kohta, W
2010	225	140,62
2011	230	143,75
2012	235	146,88
2013	245	153,13
2014	250	156,25

Tabeli teises tulbas on välja toodud standardsete ehk 1,6 m² päikesepaneelide keskmised võimsused aastatel 2010-2014 ning kolmandas on need võimsused teisendatud 1 m² kohta. Teades paneelides võimsuseid ruutmeetri kohta ning nende hinnadünaamikat samal perioodil on võimalik teada saada nende hinnad ruutmeetri kohta.



Joonis 2. Päikesepaneelide hind aastatel 2010-2014 ruutmeetri kohta.

Jooniselt 2 on näha, et hinnad ruutmeetri kohta on vaadeldaval perioodil märgatavalt langenud.

3. LIGINULLENERGIAHOONE

Ehitussektor on üks suurimaid energia tarbijaid Euroopa Liidus, moodustades 40% kogu energia lõpptarbimisest. Seetõttu on loodud erinevaid direktiive, millega tõstetakse taastuvenergia lahenduste osakaalu ehitiste juures, et toota elektrit, kuuma tarbevett, soojustada ja jahutada. Euroopa Liidu Energiatõhususe Direktiiv näeb ette, et selle liikmesriigid, kaasaarvatud Eesti, peavad järgima uute ja oluliselt rekonstrueeritavate hoonete osas energiatõhususe nõudeid. Aastast 2021 peavad kõik uusehitised olema liginullenergiahooned. Sealjuures peavad täitma neid nõudeid riigiasutuste kuuluvad ja kasutatavad uusehitised aastast 2018. Liginullenergiahoone puhul on tegemist hoonega, mille energiatõhususarv on suurem kui 0 kWh/(m²/a), kuid mitte suurem, kui tabelis 1 välja toodud piirväärtused [28].

Tabel 1. Energiatõhususe miinimumnõuded [29]

Hoone tüüp	Energiatõhususarv, kWh/(m ² /a)
väikeelamud	50
korterelamud	100
büroohooned ja raamatukogud	100
ärihooned	130
avalikud hooned	120
kaubandushooned ja terminalid	130
haridus- ja teadushooned	90
koolieelsed lasteasutused	100
tervishoiuasutused	220

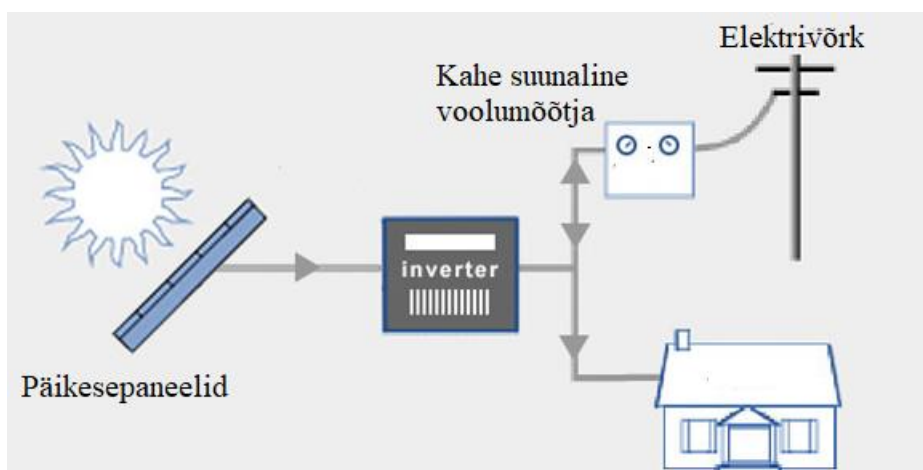
Nõutud energiatõhususarvu saavutamiseks on hoonete ehitamisel vaja kasutada parimat ehituspraktika meetmeid ning ära kasutada taastuvenergiatehnoloogia lahendusi. Kõikidest taastuvenergialahendustest, mida on võimalik rakendada ehitus sektori juures, et saavutada nõutud energiatõhususarvu, leiavad enim kasutust päikeseenergia süsteemid.

4. PÄIKESEENERGIA SÜSTEEMID

Päikeseenergiast elektrit tootes on võimalik rajada päikesejaamu, mis on võrguga ühendatud (*on-grid*) kui ka autonoomseid süsteeme (*off-grid*). Sõltuvalt asukohast ja võimalustest tuleb teha sobilik valik.

4.1. Võrguga ühendatud süsteem

On-Grid ehk võrguga ühendatud süsteemi puhul on tegemist sellise lahendusega, kus ollakse elektrivõrguga ühenduses. Antud süsteemi puhul tegutseb akumulaatorina elektrivõrk ise. Seega pole vaja teha lisainvesteeringuid akude näol, mis on kulukad ja põhjustavad lisa kadusid. Seetõttu on selline lahendus ka odavam, kui *off-grid* süsteem. Elektrivõrguga liitumisel kasutatakse invertereid, mis muundavad päikeseenergiast saadava alalisvoolu vahelduvvooluks, mis ühildub hoone elektrivõrguga. Tarbimisest ülejääv energia suunatakse tagasi elektrivõrgu ning juhul kui jääb toodetust elektrist puudu, siis võetakse see taas elektrivõrgust [30].

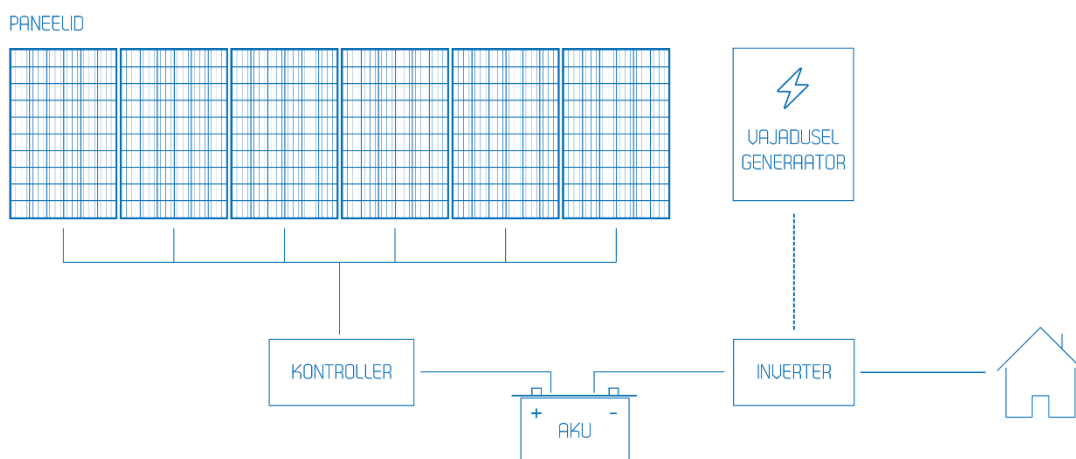


Joonis 4.1. On-grid süsteemi põhimõtteskeem [30].

Joonisel 4.1 on väljatoodud *on-grid* süsteemi põhimõtteskeem lihtsustatud kujul. Süsteem koosneb päikesepaneelidest ja nende kinnitustest, inverterist, kahe suunalisest voolumõõtjast ning akumulaatorina toimivana elektrivõrgust. Antud süsteemi puhul on siiski võimalik kasutada ka akusid, kuhu salvestatakse üle jääv energia ning akude täitumisel suunatakse see edasi elektrivõrku. Sellisel juhul tuleb aga silmas pidada seda, et tingitud akude kõrgest maksumusest kasvaks märgatavalt tasuvusaeg.

4.2. Võrguühenduseta süsteem

Juhul, kui on tegemist piirkonnaga, kus elektriühendus puudub ning selle rajamine oleks liiga kulukas või soovitakse lihtsalt olla sõltumatu üldisest elektrivõrgust, siis on sobivaks lahenduseks autonoomne ehk *off-grid* süsteem. Võrreldes *on-grid* süsteemiga, on tegemist kallima lahendusega, mis on tingitud sellest, et see eeldab akude olemasolu, kuhu ülejääv toodetud elektrienergiast suunatakse. Samas leiavad autonoomsed süsteemid üha enam kasutust ka piirkondades, kus on tegelikult olemas võimalus liituda elektrivõrguga, mis on tingitud akude hindade langusest. Autonoomse süsteemi suurimaks eeliseks on sõltumatus, mida võib pidada ka miinuseks, kuna päikesepaneelide toodang on sõltuv ilmastikuoludest. Perioodidel, mil päikesest saadav energia on minimaalne, võib tekkida probleeme elektrivarustusega. Seetõttu oleks sellise lahenduse puhul mõistlik investeerida ka tagavara generaatorisse, mis tagab elektri olemasolu ning akude laadimise [30].



Joonis 4.2. *off-grid* süsteemi põhimõtteskeem [31].

Tüüpiline *off-grid* süsteem koosneb päikesepaneelidest, kontrollierist, akudest, inverterist ning vajadusel tagavara generaatorist. Kontrolleri ülesandeks on reguleerida akudesse minevat voolu ning kaitsta neid ülelaadimise eest.

5. PV süsteemi planeerimine

PV süsteemi planeerides tuleb arvesse võtta mitmeid parameetreid. Selgeks tuleks teha hetke olukord, arvestada erinevate paigaldusviiside võimalustega ning tutvuda kliima tingimustega. Parema ülevaate saamiseks on loodud erinevaid tarkvaraprogramme, mille abil on võimalik simuleerida, hinnata ning analüüsida olukorda. Programme leidub erineva raskusastmega sõltuvalt nende eesmärkidest. Enamus programme on varustatud juba oma andmebaasidega ning kergematel juhtudel jääb kasutajal üle vaid määrata mõned parameetrid, et kätte saada eeldatavad tulemused. Üks kõige lihtsamini kasutatav programm on PVGIS.

Bakalaurusetöö raames tutuvs autor programmi HOMER võimalustega, et modelleerida selliseid süsteeme, mis on sõltuvad tuuleenergiast, et saada ülevaade tuulikute tootlikusest. Samamoodi on seal võimalik modelleerida ka PV süsteeme, et saada paremat ülevaadet. Antud töö raames tugineb autor PV*SOL programmile.

5.2. PV*SOL

Täpsema ülevaate saamiseks on mõistlik pöörduda asjatundjate poole või tugineda keerulisematele programmidele, mis samas tagavad ka täpsemad tulemused. Üheks selliseks programmiks on PV*SOL Premium, mille puhul on tegemist simulatsioonitarkvaraga, mis tagab detailisema ülevaate nii toodangust kui ka tasuvusest. Võrreldes PVGIS keskkonnaga võtab antud programm arvutuste tegemisel tunduvalt rohkem parameetreid arvesse. Simulatsiooni programmis on samuti olemas kliimaandmed Eesti erinevate paikade kohta ja lisaks sellele sisaldab programm enamus olemasolevaid päikesepaneele ja invertereid koos nendele omaste karakteristikutega. Tänu sellele on võimalik täpsem ülevaade saada kasutaja poolt valitud päikesepaneelide toodangu kohta. Samuti võimaldab programm modelleerida 3D keskkonnas konkreetseid situatsioone, koos puude, naabermajade ja muude varje tekitavate objektidega ning seejärel võtab programm

arvutuse ajal ka tekkivaid varje arvesse. Teades oma igakuised tarbimisandmeid, on võimalik need programmi sisestada ning olles modelleerimisega ühel pool, võimaldab PVSOL näidata ka seda, kui palju suudetakse toodetud energiast koha peal ära tarbida.

5.3. Kiirgushulgad

Tuginedes PV*SOL andmebaasidele saab vaadelda, kuidas muutuvad kiirgushulgad kuus keskmiselt sõltuvalt kaldest. Kiirgushulgad kaldpinnal on PV*SOL programmis leitavad järgneva valemiga [32]:

$$E_{G,tilted} = E_{dir,tilted} + E_{diff,tilted} + E_{refl,tilted}, \quad (5.1)$$

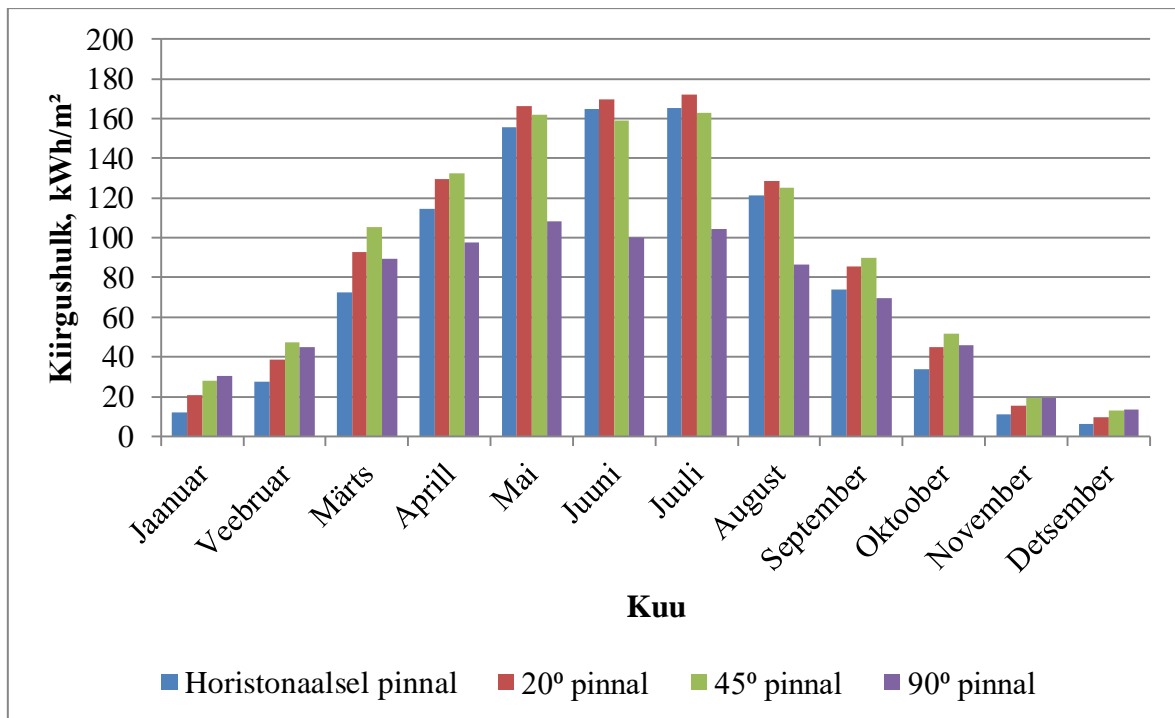
kus $E_{G,tilted}$ on kiirgushulk kaldpinnal W/m^2 ;
 $E_{dir,tilted}$ – otsene kiirgus kaldpinnal W/m^2 ;
 $E_{diff,tilted}$ – hajuskiirgus kaldpinnal W/m^2 ;
 $E_{refl,tilted}$ – peegeldunud kiirgus W/m^2 .

Peegeldunud kiirgus leitakse programmis läbi horisontaalse pinna kiirgushulga ja paneelide paigaldusnurga. Hajusa kiirgushulga leidmiseks kaldpinnal tuginetakse *Hay and Davies*'e valemile, mis on järgmine [33]:

$$E_{diff,tilted} = I_d [f_{Hay} \left(\frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \right) + \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) (1 - f_{hay})] \quad (5.2)$$

kus I_d on otsene kiirgus, W/m^2 ;
 f_{Hay} – anisotroopia indeks;
 θ – nurk päikesekiirte ja PV paneelide vahel;
 θ_z – päikese seniidinurk;
 β – Päikesepaneelide nurk maapinna suhtes;

Tulemused on kujutatud joonisel 5.1.



Joonis 5.1. Keskmised kiirgushulgad aastas.

Jooniselt 5.1 on näha, et kiirgushulgad pimedamatel kuudel ehk siis novembrist veebruarini väga palju ei erine. Kõige madalamad on kiirgushulgad detsembris, olles horisontaalsel pinnal kuus 6,22 kWh/m². Suurimad erinevused tulevad ilmsiks siis, kui päevavalgust on rohkem. Maist kuni juunini erinevad kiirgushulgad umbes poolteist korda, kui võrrelda omavahel tulemusi 45 ja 90 kraadise nurga korral. Parimaks kuuks PV*SOL andmebaaside kohaselt on juuli kuu, kus 45 kraadise pinna puhul on kuine kiirgushulk 162,82 kWh/m². Samal kuul 90 kraadise nurga korral on kiirgushulgaks 104,49 kWh/m² ehk 1,55 korda vähem. Sellest tulenevalt on ka fassaadile paigutatud päikesepaneelide tootlikkus väiksem. Samuti tuleb ilmsiks see, et suve kuudel jõuab päikesekiirgust kõige rohkem 20 kraadisele pinnale, kuid aastas kokku siiski 45 kraadisele pinnale.

5.4. Päikesepaneelide valik

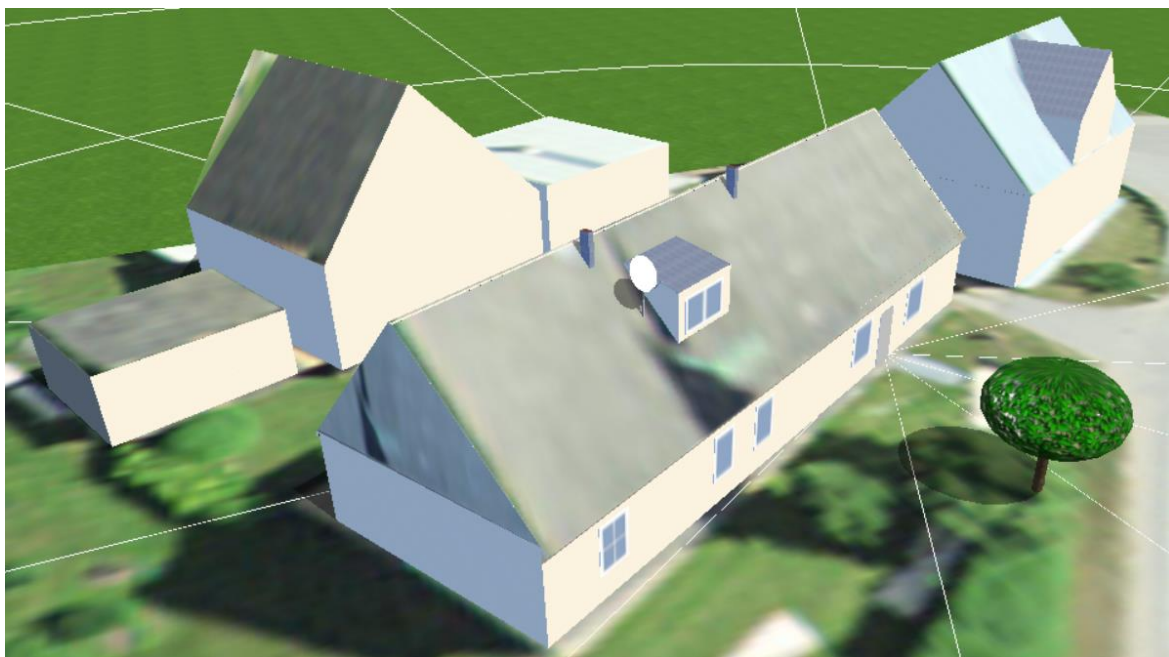
PV*SOL programmis on olemas suur päikesepaneelide andmebaas, mida pidevalt ka täiendatakse. Juhul, kui endale sobivat päikesepaneeli sealt ei leia, siis on võimalik seda käsitsi lisada koos kõikide parameetritega. Autor valis välja 6 erinevat päikesepaneeli, et tulemusi omavahel võrrelda. Väljavalitud päikesepaneelide peamised tehnilised andmed on toodud välja tabelis 5.1.

Tabel 5.1. Kasutatud päikesepaneelide tehnilised andmed [34,35,36,37,38,39]

	SF170-S	PowerMax 3.5	CX3 85	FS-4122-3	ECO-350M	WST285-P6
Tüüp	CIS	CIS	CdTe	CdTe	mono-si	poly-si
Maksimaalne võimsus P_{\max} , W	170	140	85	122,5	350	285
Efektiivsus η , %	13,8	13,3	11,86	16,98	18	17,55
Avatud ahela pinge U_{oc} , V	112	59,8	60,01	88,7	47,5	38,92
Lühisvool I_{sc} , A	2,2	3,36	2,17	1,85	9,38	9,02
Pinge maksimum võimsusel U_{mpp} , V	87,5	46,1	45,1	71,5	39,1	33,25
Vool maksimum võimsusel I_{mpp} , A	1,95	3,04	1,89	1,71	8,94	8,78
Temperatuuri koefitsent	-0,31/°C	-0,39/°C	-0,25/°C	-0,28/°C	-0,39/°C	-0,43/°C
Mõõtmed, mm	1257*977*35	1587*664*38	1200*600*6,9	1200*600*7	1956*992*40	1665*999*35

6. Modelleeritud süsteem

Parema ülevaate saamiseks modelleeris autor päikesepaneelide süsteemi, et võrrelda paneelide tootlikkust sõltuvat nende paigaldusviisist.



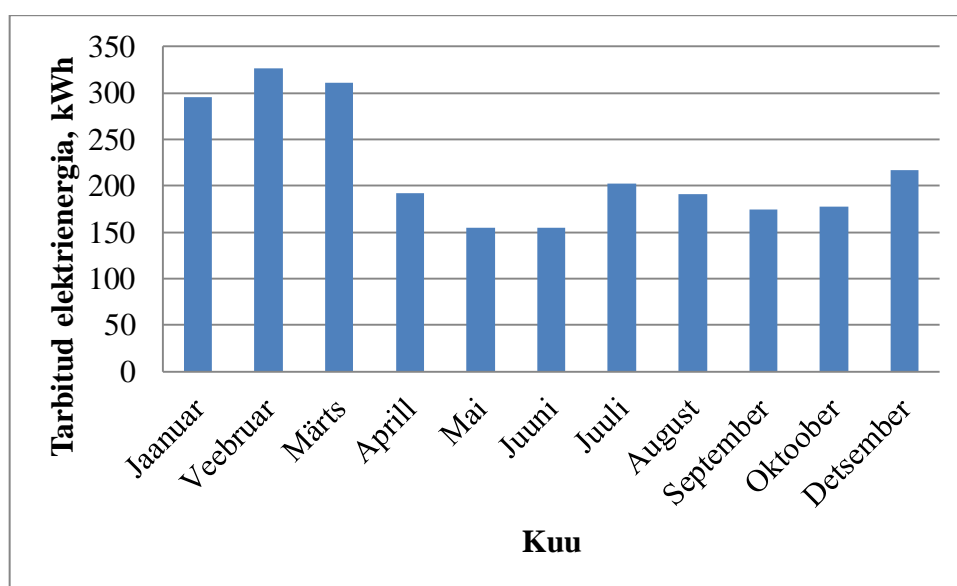
Joonis 6.1. Modelleeritud olukord PV*SOL keskkonnas.

Uuritavaks objektiks valiti ühepereelamu, mis asub Tartumaal. Hoone pindala on 192 m^2 . Eesti tingimustes on optimaalne suunata PV paneelid lõunasse, et saada maksimaalset tootlikkust. Antud hoone puhul pole ühtegi sellist seina, mis oleks suunatud täpselt lõuna ilmakaarde. Sellest tingituna uuritakse olukorda, kus paneelid on paigaldatud kirde suunas, täpsemalt 152° põhja ilmakaare suhtes, olevale fassaadile ja katusele. Potentsiaalset katusepinda, mida on võimalik ära kasutada on 144 m^2 ning fassaadi 61 m^2 .

6.1. Elamu energiatarve

Vaatluse all oleva hoone energiatarbimise ajalugu pärineb Elektrilevi e-teenindusest ning vaatluse alla on võetud aasta 2017. Elektrilevi e-teeninduse keskkonnast on võimalik ülevaade saada oma igakuise tarbimise kohta ning suurema huvi korral ka tunnipõhised tarbimisandmed. Teades energiatarbimise ajalugu on võimalik vaadelda, milline PV süsteemi paigaldusviis õigustaks ennast.

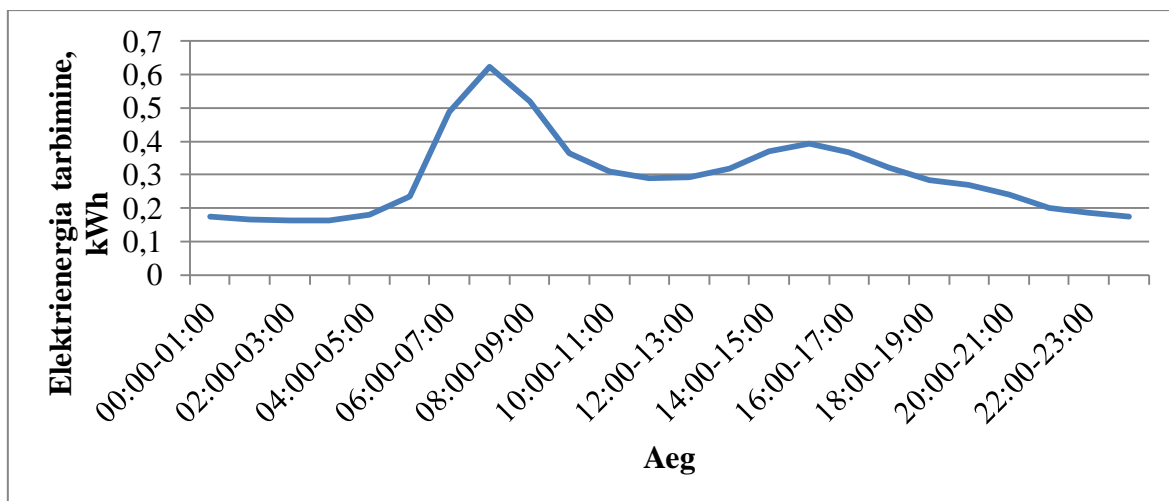
Vaadeldava elamu 2017 aasta elektri kogutarbimine oli 2578 kWh. Elektritarbimise jaotumine kuude lõikes on kujutatud joonisel 6.2.



Joonis 6.2. Elektrienergia tarbimine kuude lõikes aastal 2017.

Jooniselt 6.2 on näha, et elektrienergia tarbimine külmematel kuudel on 100-150 kWh suurem, mis on tingitud sellest, et võetakse kasutusele lisa kütteallikad elektriradiaatorite näol.

Täpsema vaatluse alla võeti tunnipõhised tarbimisandmed, mis seejärel töödeldi Microsoft Excel abil aasta keskmisteks ning tulemused on kajastatud joonisel 6.3



Joonis 6.3. Aastane keskmistatud tunnipõhine elektritarbimine.

Tingitud sellest, et tegemist on elamuga, kus praktiliselt keegi koguaeg kodus viibib, siis toimub ka pidev elektrienergia tarbimine, mistõttu oleks hea ära kasutada päikeselt saadavat energiat. Suurimad tarbimised toimuvad hommikul kella 6-8 ajal ning samuti kasvab tarbimine õhtupoolikul 4-5 ajal.

6.2. Päikesepaneelide tootlikkus

Tootlikkuse võrdlemiseks sõltuvalt paigaldusviisist võetaks arvesse seda, et vaba pinda fassaadil on modelleeritud hoone puhul vähem, seega on süsteemi võimsused pandud paika selle põhjal, kui palju paneele mahuks fassaadile maksimaalselt. Sellest tulenevalt pannakse paika ka paneelide arv katuse paigalduse korral. Lamekatusele paigaldatavate paneelide tootlikkuse võrdlemiseks tuleb vaatluse alla võtta olukord, kus paneelid paigaldatakse abihoonele, kuna peahoonele on 45 kraadine kaldkatus. Lamekatuse paigalduse korral vaadeldakse olukorda, kus PV paneelid on 0° ja 20° maapinna suhtes. Lamekatuse pindalaks on 64 m^2 .

PV süsteemide võimsused ja paneelide arvud on toodud välja tabelis 5.7.

Tabel 6.1. PV süsteemide võimsused

PV Paneel	Paneelide arv	Süsteemi võimsus, kW
1	2	3
SF170-S	20	3,4

Tabel 6.1. järg

1	2	3
PowerMax SKALA	20	2,8
CX3 85	40	3,4
FS-4122-3	40	4,9
ECO-350M	11	3,85
WST 285-P6	11	3,14

Tingitud kristalsete paneelide suuremast võimsusest, on võimalik saavutada nende abil suurem süsteemi võimsus vähemate paneelide näol. Õhukeskileelistest päikesepaneelidest on kõige suurema võimsusega FS-4122-3 paneel, mille kasutamisel saavutatakse kõige suurema võimsusega süsteem, kuid sealjuures kasutatakse praktiliselt 4 korda rohkem paneele, kui süsteemide puhul, kus kasutatakse kristalseid paneele.

Modelleerides vastavad süsteemid simulatsioonitarkvaras, leitakse PV süsteemide tootlikkus. PV*SOL programm tugineb paneelide tootlikkuse leidmiseks nende volt-amper karakteristikule, suutes simulatsiooni käigus määrata paneelide väljundvõimsused konkreetsel ajahetkel sõltuvalt mooduli temperatuurist ja paneelile langevast kiirgushulgast. Mooduli temperatuur arvutatakse sealjuures järgneva valemiga [32]:

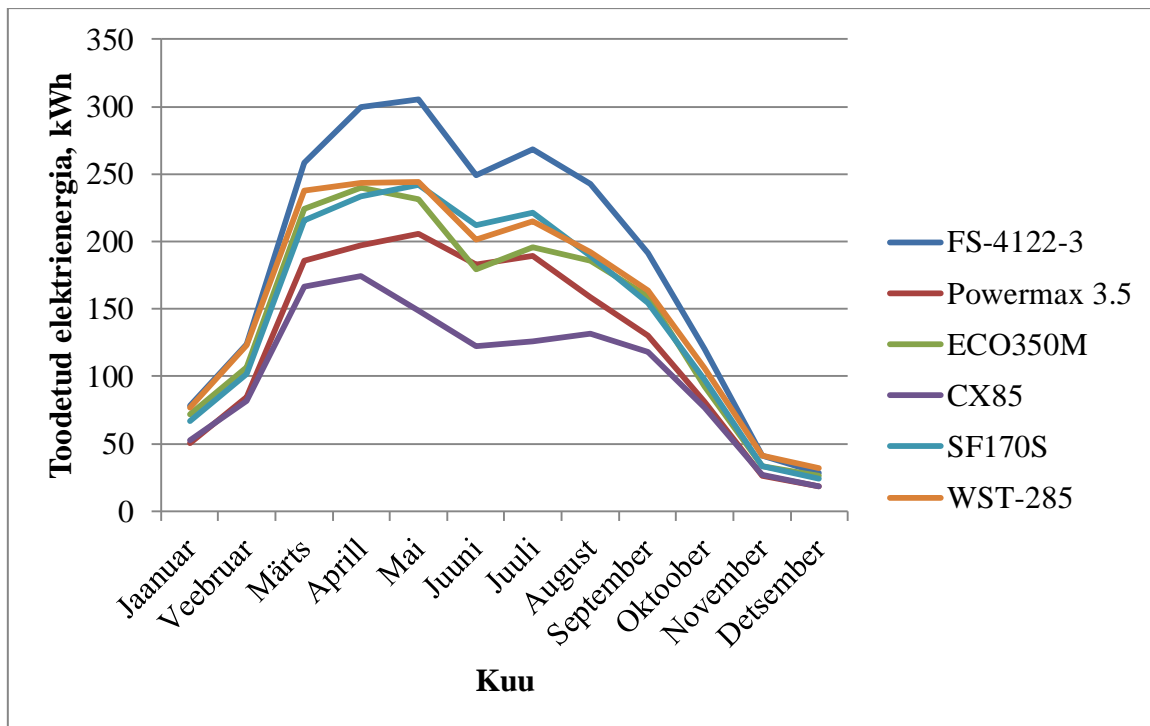
$$T_{module} = T_{amb} + DT \cdot \frac{E}{E_{stc}}, \quad (6.1)$$

kus T_{module} on mooduli temperatuur °C;
 T_{amb} - välisõhu temperatuur °C;
 DT - koefitsent sõltuvalt paigaldusviisist;
 E - paneelile langev kiirgushulk W/m²;
 E_{stc} - kiirgushulk standardtingimustes W/m².

Tabel 6.2. DT väärtus sõltuvalt paigaldusviisist standardtingimustes [32]

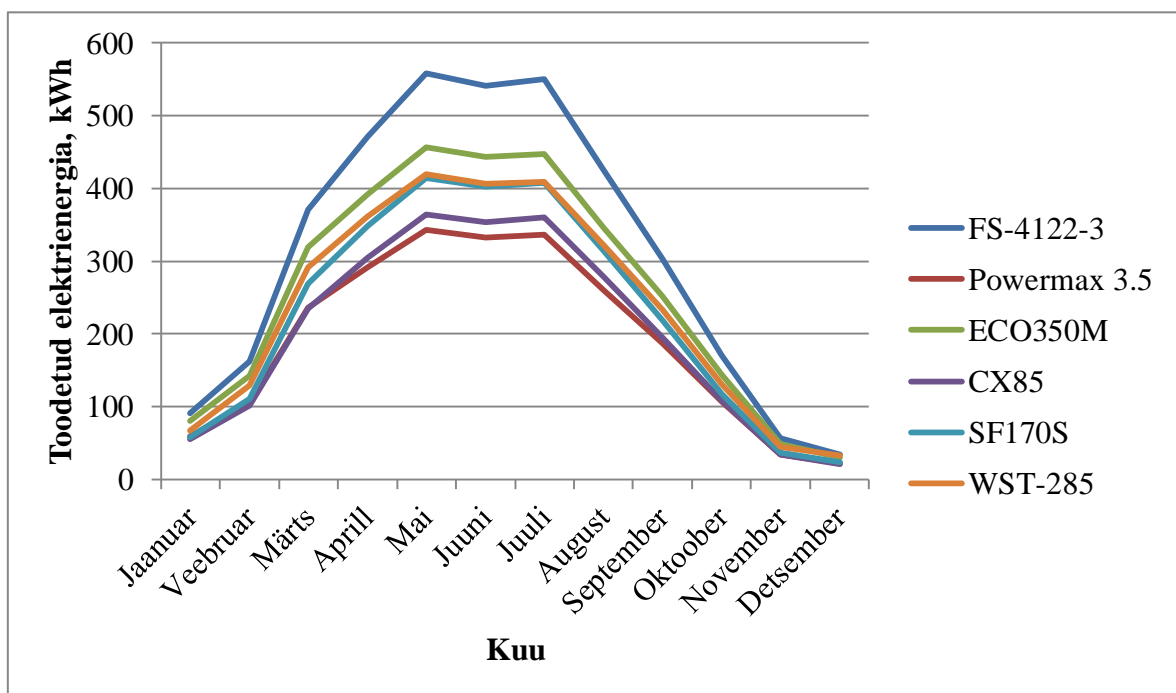
Katusega paralleelselt	29 K
Integreeritud katusesse - ventilatsiooniga	32 K
Integreeritud katusesse	43 K
Paigaldus katuse kohal	28 K
Paigaldus avatud alal (maapinnal)	22 K

Tulemused on toodud välja lisas A tabelis A.1 ning kujutatud joonistel 6.4-67.



Joonis 6.4. PV süsteemide tootlikkus fassaadile paigaldades.

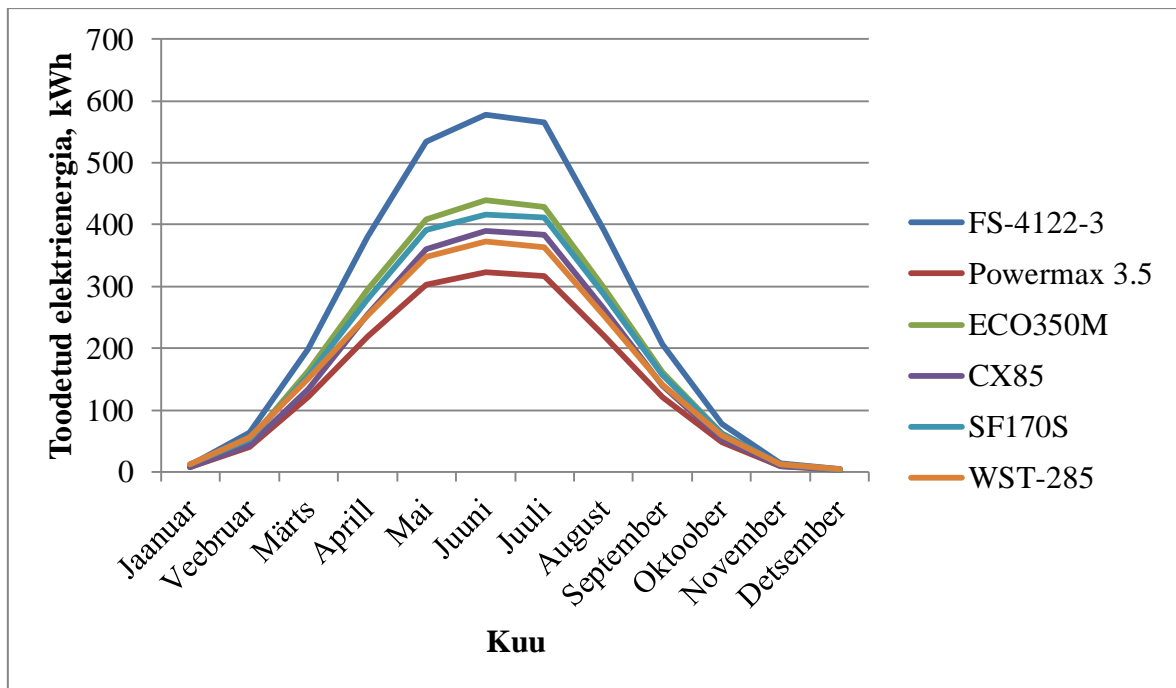
Paigaldades PV süsteem 90 kraadise nurga alla, jääb enamus PV süsteemide iga kuine toodang alla 300 kWh. Parima tootlikkusega on süsteem, kus kasutatakse kõrge efektiivsusega CdTe tehnoloogial põhinevat FS-4122-3 päikesepaneeli. Antud süsteem saavutab kõrgema tootlikkuse võrreldes kristall-räni tehnoloogial põhinevate süsteemidega tänu sellele, et FS-4122-3 paneelid on oma mõõtmetelt väiksemad, mistõttu on neid võimalik rohkem fassaadile paigutada ja sellega tagatakse suurem süsteemi võimsus. 90 kraadise paigalduse korral on nelja süsteemi (FS-4122-3, Powermax 3.5, SF170S, WST-285) tootlikkus kõige parem mai kuus ja kahe süsteemi (ECO-350M, CX3 85) tootlikkus kõrgeim aprilli kuus. Võrreldes mai kuuga langeb süsteemide tootlikkus juuni kuus märgatavalt – kuni 60 kWh, mis võib olla tingitud kõrgemast temperatuurist ja varjudest. Võrreldes omavahel süsteeme, kus kasutatakse ECO-350M ja PowerMax 3.5 päikesepaneeli, siis tuleb ilmsiks, et kui muidu on monokristalse päikesepaneeli toodang suurem, siis juuni kuus on see väiksem. Sarnane asi tuleb ka ilmsiks, kui võrrelda omavahel süsteeme, kus kasutatakse polükristalseid päikesepaneeli WST 285-P6 ja CIS tüüpi päikesepaneeli SF170-S. Süsteemide toodangud erinevad mai kuus ainult 2 kWh võrra ning kuni augusti kuuni on polükristalselte paneelide toodang madalam. Madalaima tootlikkusega on PV süsteem, kus kasutatakse CX3 85 PV paneeli – aastane kogutoodang 1245 kWh.



Joonis 6.5. PV süsteemide tootlikkus 45° kaldkatusel.

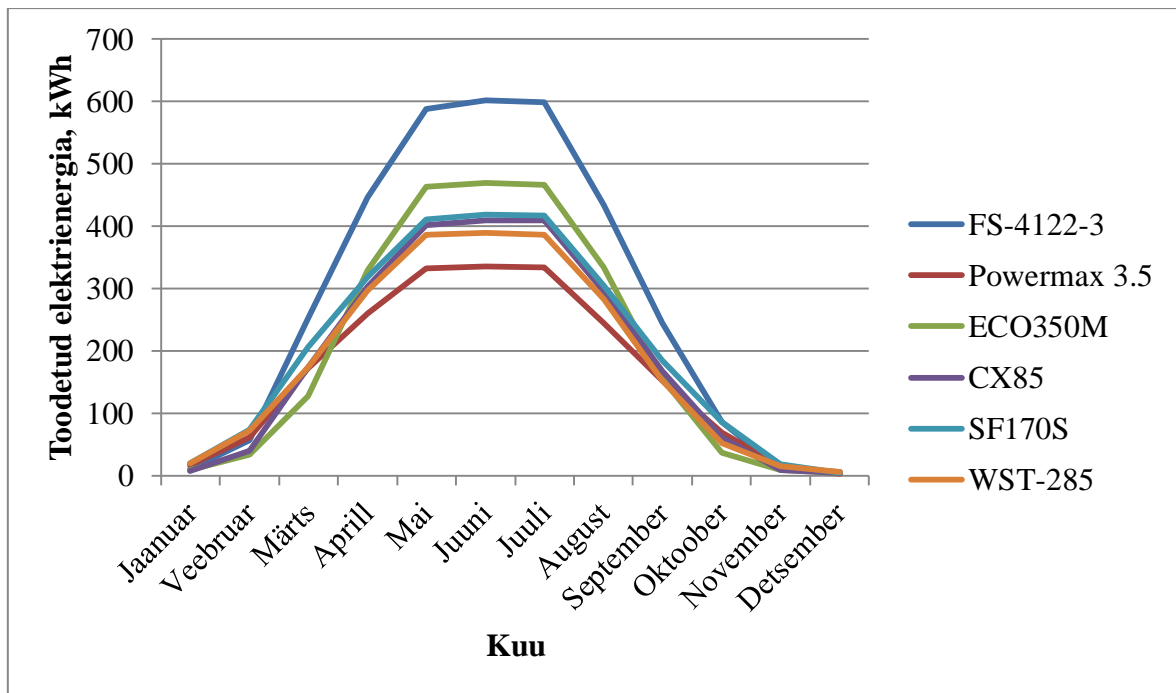
Joonisel 6.5 on näha, et PV süsteemide tootlikkus 45 kraadise paigalduse korral on märgatavalt parem. 90 kraadise paigutuse korral oli parimal kuul parima süsteemi tootlikkuseks 305 kWh. Antud juhul ületavad aga kõik süsteemid selle tootlikkuse. Parima tootlikkusega on endiselt kõrgeima võimsusega PV süsteem, kus kasutatakse FS-4122-3 paneele, olles kõrgeim mai kuus –558 kWh. Ilmsiks tuleb ka asjaolu, et kaldkatusel paigaldades PV süsteeme, siis tootlikkus on kõikidel juhtudel parim mai kuus. Võrreldavate paneelide tootlikkused erinevad kõige vähem talve perioodil ning kõige rohkem suvel.

Tuginedes modelleeritud süsteemidele ja PV*SOL arvutustele selgub, et PV süsteemide aastane kogutoodang väheneb fassaadi installatsioonide korral 34-48%, olenevalt süsteemist. Suurtest kadudest tingituna poleks antud hoone puhul mõistlik PV süsteeme fassaadile paigutada.



Joonis 6.6. PV süsteemide tootlikkus lamekatusel 0°.

Jooniselt 6.6 on näha, et paigaldades PV süsteeme lamekatusele 0 kraadise nurga alla, siis on süsteemide tootlikkus novembrist kuni jaanuarini praktiliselt olematu, küündides parimatel juhtudel 13 kWh'ni. Maist kuni juulini on tootlikkused praktilised samad, mis 45 kraadise paigutuse korral, osade süsteemide puhul isegi paremad. Antud lahenduse puhul mõjutavad tootlikkust ka varjud, mida põhjustab kõrvalhoone. Sellegipoolest on PV süsteemide tootlikkus parem, kui fassaadi installatsioonide korral. Erinevalt eelnevatest lahendustest, kus parima tootlikkusega oli mai kuu, siis antud lahenduse puhul on parimaks kuuks tootlikkuse mõistes juuni.



Joonis 6.7. PV süsteemide tootlikkus lamekatusel 20°.

Tingitud sellest, et abihoone katuse pind on võrdlemisi väikene ja võrdlus momendi tekkimiseks oli eesmärk iga paigalduse korral kasutada sama võimsusega süsteeme, siis otsustati 20 kraadise kaldenurga kasuks, et mahutada ära piisavalt paneele ilma liigsete varjude tekkega.

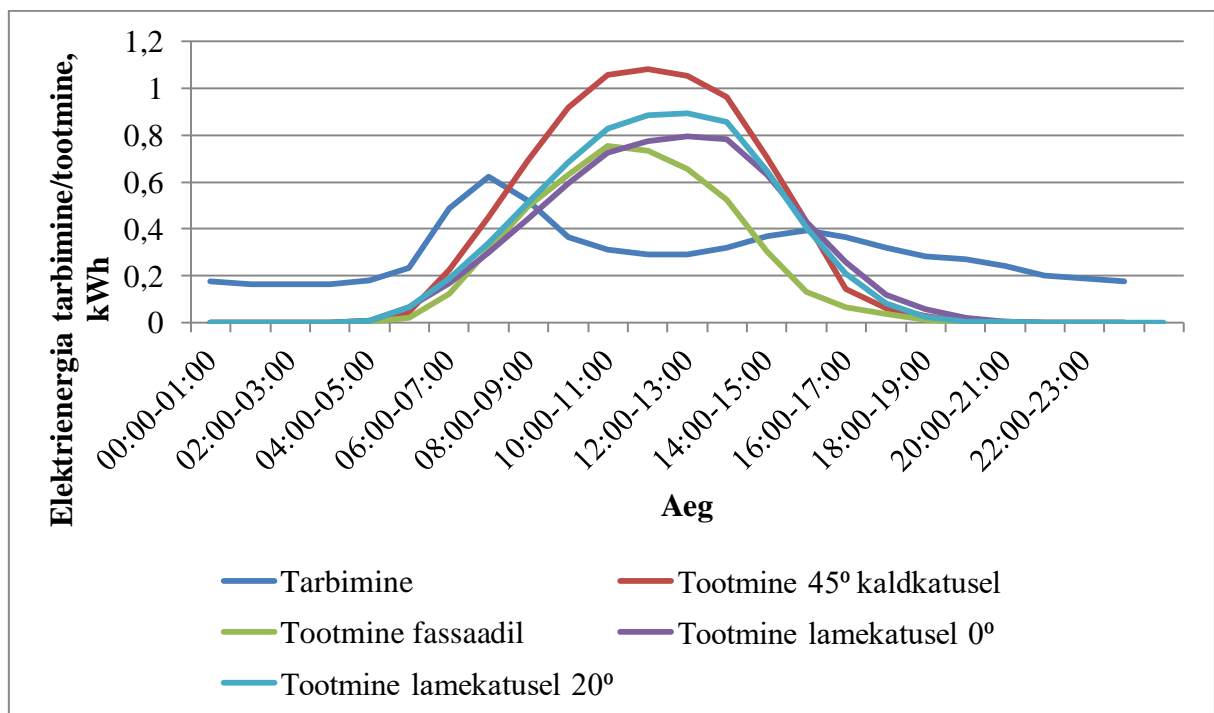
Joonisel 6.7 on näha, et ka sellise lahenduse puhul on süsteemide tootlikkus perioodil novembrist kuni jaanuarini võrdlemisi olematu. Samuti on antud süsteemide tootlikkus mõjutatud kõrvalhoone poolt tekitatud varjudest ning osaliselt tekitavad varje ka PV paneelid ise, mille tõttu väheneb tootlikkus keskmiselt aastas 14%. Aastased kogutoodangud on siiski paremad, kui fassaadi ja 0 kraadise installatsioonide korral, kuid jäävad alla süsteemidele, mis on paigaldatud kaldkatusele. Süsteemide tootlikkused erinevad üksteisest perioodil mai kuni juuli maksimaalselt 8 kWh, kuid parima tootlikkusega kuu on siiski juuni kuu.

6.3. Elektrienergia tootmise ja tarbimise ajaline kattuvus

Üheks suurimaks probleemiks seoses päikesepaneelidega peetakse seda, et päikeseenergiat ei suudeta maksimaalselt ära kasutada, kuna hoone energivajaduse tipud ei lange kokku

tootmis tippudega. Peamine tarbimine toimub reeglina hommikul ning õhtupoolikul, kuid paneelide tootlikkus on kõrgeim keskpäeval.

Sisestades PV*SOL programmi oma tarbimisandmed, on programm võimeline välja selgitama, kui suure osa toodetud elektrienergiast on võimalik koha peal ära tarbida ning selle tulemusena saada parem ülevaade. Andmeid töödeldi Microsoft Exceliga ning lõpptulemusena on saadud iga lahenduse kohta keskmistatud tunnipõhised tootmisandmed, et neid võrrelda tunnipõhiste tarbimisandmetega. Tulemused on kujutatud joonisel 6.5.



Joonis 6.8. Elektrienergia keskmistatud tarbimine ja tootmine ööpäevas.

Jooniselt 6.8 on näha, et võttes arvesse keskmiseid väärtuseid, siis PV süsteemid algavad elektrienergia tootmisega hommikul 5-6 ajal ning tootmine lõpeb õhtul 8-9 ajal. Reaalsuses see aasta läbi nii ei ole, kuna päevade pikkused muutuvad aastaegade vahetumisega, mis mõjutab päikesepaneelide tootlikkust. Vaadeldava hoone peamine elektri tarbimine toimub hommikul 6-8 ajal ning samuti kasvab tarbimine õhtul 3-5 ajal. Tingitud sellest, et elamus väga suuri tarbijaid ei ole, siis ei kõigu ka võimsused palju. Sõltuvalt paneelide paigaldusnurgast saavutatakse kõrgeim tootlikkus erinevatel aegadel. Kaldkatusele paigaldatavate süsteemide tootlikkus on kõrgeim 11-12 ajal, mis ajaks on elamu tarbimine langenud võrreldes hommikuse tarbimisega madalamaks. Lamekatusele paigaldatud süsteemide tootlikkus saavutab oma tipu tund aega hiljem ehk 12-13 ajal ning

fassaadile paigaldatud paneelid saavutavad kõrgeima tootlikkuse tund aega varem ehk 10-11 ajal. Selleks ajaks, kui elamus hakkab elektri tarbimine taas kasvama on päikesepaneelide toodangud taas langemas.

Tabelisse 6.3 on kantud see, kui palju modelleeritud süsteemide toodetud elektrienergiast suudetakse koha peal ära tarbida, kui suure osa see moodustab kogutoodangust ning kui suure osa see moodustab hoone energiatarbest.

Tabel 6.3. PV süsteemide aastase kogutoodangu tarbimise osakaal

	Toodangu aastane tarbimine, kWh	Tarbitud toodangu osakaal energiatarbest, %	Tarbitud toodangu osakaal kogutoodangust, %
Fassaad			
SF170-S	714	27,70	39,82
PowerMax SKALA	675	26,18	44,68
CX3 85	664	25,76	53,31
FS-4122-3	758	29,40	34,34
ECO-350M	689	26,73	39,40
WST 285-P6	764	29,64	40,69
Keskmine	710	27,57	42,04
Kaldkatus			
SF170-S	857	33,24	31,51
PowerMax SKALA	831	32,23	35,94
CX3 85	844	32,74	35,02
FS-4122-3	930	36,07	24,91
ECO-350M	890	34,52	28,70
WST 285-P6	921	35,73	32,36
Keskmine	878	34,09	31,41
Lamekatus (0°)			
SF170-S	768	29,79	34,31
PowerMax SKALA	704	27,31	40,63
CX3 85	729	28,28	35,69
FS-4122-3	811	31,46	26,79
ECO-350M	747	28,98	32,06
WST 285-P6	763	29,60	37,63
Keskmine	753	29,23	34,52
Lamekatus (20°)			
SF170-S	786	30,49	31,91
PowerMax SKALA	738	28,63	37,00
CX3 85	717	27,81	31,43
FS-4122-3	791	30,68	23,73
ECO-350M	703	27,27	28,84
WST 285-P6	767	29,75	34,38
Keskmine	750	29,11	31,21

Tabelist 6.3 on näha, et kõige rohkem suudetakse toodetud elektrienergiast ära kasutada juhtudel, kus PV süsteemid on paigaldatud elamu kaldkatusele 45 kraadise nurga alla, moodustades keskmiselt 34,09% elamu aastasest energiatarbest. See näitab seda, et selliste süsteemide tootlikkus on võrreldes teiste süsteemidega parem sel perioodil kui elamus tarvitakse rohkem elektrit. Üldiselt jäävad need väärtused siiski 30% lähedusse, mis näitabki seda, et vaatamata paigaldusviisist ja kasutatavast tehnoloogiast, siis suudetakse kolmandik toodetud elektrienergiast koha peal ära kasutada. Halvimaid näitajaid omavad süsteemid, kus PV paneelid on paigaldatud hoone fassaadile, mis on tingitud sellest, et kiirgushulgad, mis jõuavad 90 kraadisele pinnale on tunduvalt väiksemad. Samuti on antud uurimustöös vaadeltavatest süsteemidest kõige rohkem probleem varjudega just fassaadi installatsioonide korral, mis mõjutavad paneelide tootlikkust. Lamekatuse paigalduste korral on aastased kogutoodangud suuremad küll süsteemidel, mis on paigutatud 20 kraadise nurga alla, kuid võrreldes keskmiseid näitajaid, siis koha peal suudetakse ära kasutada rohkem 0 kraadise paigutuse korral. See võib olla tingitud sellest, et abihoone katusepind pole piisav, et paigutades paneele 20 kraadise nurga all ei tagata piisavaid vahedesisid, et nad ei hakkaks üksteist varjutama.

6.4. Järeldused

Simulatsiooniprogrammis modelleeriti süsteemid, kus PV paneelid olid paigaldatud hoone 45° kaldkatusele, fassaadile ning abihoonel olevale lamekatusele horisontaalselt ning 20° nurga all. Lahendust, kus PV süsteem on paigaldatud maapinnale ei uuritud, kuna reaalses elus puudub antud krundil vastav asukoht, kus selline lahendus oleks mõistlik. Tootlikkust silmas pidades, on kõige mõistlikum simuleeritud olukorras paigaldada PV süsteeme hoone kaldkatusele, kuna hoone kaldenurk on ligilähedane eestis soovitatud optimaalsele nurgale, millega tagatakse paneelide suurim tootlikkus.

Fassaadi installatsioonide korral väheneks aastane kogutoodang võrreldes kaldkatusel olevate süsteemidega 34-48%. Suur tootlikkuse vähenemine on eelkõige tingitud sellest, et kiirgushulgad, mis jõuavad vertikaalsele pinnale on väiksemad ning samuti on sellise lahenduse puhul rohkem probleeme varjudega. Võttes arvesse hoone elektritarbimist ajal, mil paneelide tootlikkus on kõige suurem, siis tuleb ilmsiks, et see moodustab keskmiselt

20% kogu päevasest tarbimisest. Arvestades seda, et fassaadi paigalduste korral ületavad PV süsteemide tootlikkus samuti keskpäevase tarbimise, siis võib ka seda lahendust kaaluda, kui muud pole võimalikud. Fassaadi installatsioonide korral suudetakse antud majapidamises tagada keskmiselt 27,57% aastasest energiatarbest.

Olukordades, kus PV süsteemid olid paigaldatud abihoone katusele, näitasid paremat tootlikkust 20° nurga all olevad süsteemid. Samas on selliste lahenduste kuised tootlikkused kehvemad, kui fassaadi installatsioonide korral, perioodil oktoobrist kuni märtsini, olles praktiliselt olematu detsembri kuus. Samas mõjutavad ka selliseid süsteeme simuleeritud olukorras varjud, mis tulenevad kõrvalhoonelt ning tingitud sellest, et katusepind pole piisav, siis varjestavad osade süsteemide korral PV paneelide read taha poole jäävaid paneele.

KOKKUVÕTE

Antud magistritöö eesmärgiks oli uurida päikesepaneelide erinevate paigaldusviiside eeliseid ja puudused. Lisaks sellele anti ülevaade olemasolevate päikesepaneelide tehnoloogiate ja turu olukorra kohta ning tutvustati kahte peamist päikeseenergia süsteemi – *on-grid* ja *off-grid*. Paigaldusviiside võrdlemiseks võeti vaatluse alla elamu Tartumaal, hangiti aastased tunnipõhised tarbimisandmed ning modelleeriti konkreetne olukord 3D keskkonnas. Modelleerimiseks kasutati simulatsioonitarkvara PV*SOL, kus on võimalik simuleerida erinevaid lahendusi ning saada võimalikult täpseid tulemusi, kuna programm arvestab arvutuste tegemisel mitmete parameetritega sh. ka varjudega.

Töö eesmärkide saavutamiseks tutvuti esimese jaotises üldlase olukorraga päikeseenergia turul ning võeti vaatluse alla selle potentsiaal. Päikeseenergia osakaal ülemaailmses energia portfellis on viimaste aastate jooksul jõudsalt kasvanud. Tingitud päikesepaneelide tehnoloogia pidevast arengust, hinna muutustest lähiminevikus ning direktiividest, mis näevad ette erinevaid energiatõhususarve uutele ja oluliselt rekonstrueeritavatele hoonetele, siis võib eeldada selle kasvu jätkamist ka tulevikus.

Teises peatükis on kirjeldatud erinevate päikesepaneelide omadusi ning nende tootmisprotsessi. Praeguse seisuga domineerivad turgu kristallilise räni baasil olevad päikesepaneelid, kuna see tehnoloogia on end aja jooksul suutnud tõestada ning praeguse seisuga on seda tüüpi tehnoloogiad parema kasuteguriga. Prognoositakse aga, et üha enam hakkab tõusma ka õhukesekileliste päikesepaneelide osakaal.

Kolmas peatükk seletab lahti liginullenergiahoone olemuse ning mistõttu on selline suund ette võetud. Päikesepaneele peetakse üheks parimaks viisiks, et saavutada nõutuid energiatõhususarve.

Neljandas peatükis on kirjeldatud päikeseenergia süsteeme, mis oma rakenduse järgi jagunevad kaheks – võrguga ühendatud süsteemid ja võrguühenduseta süsteemid. Mõlemal lahendusel on oma plussid ja miinused. Autonoomse süsteemi puhul on tegemist hea

lahendusega, kui asutakse piirkonnas, kus elektriühendus puudub ning selle rajamine osutuks kulukamaks, kui PV süsteemi rajamine.

PV süsteemide planeerimiseks on tänapäeval loodud mitmeid programme, mis annavad parema ülevaate enne reaalse otsuse tegemist. Tarkvarasid on erineva raskusastmega. Viiendas peatükis on tutvustatud antud magistritöös kasutatud simulatsioonitarkvara võimalusi. Samuti on vaadeldud seda kuidas muutuvad kiirgushulgad sõltuvalt pinna kaldenurgast tuginedes PV*SOL andmebaasidele. Aastane kiirgushulk on vaadeltavatest olukordades suurim 45° nurga korral – 1095,70 kWh/m² ja madalaim 90° nurga korral – 810,23 kWh/m². Viiendas peatükis on välja toodud ka modelleerimise käigus kasutatud päikesepaneelide tehnilised andmed. Võrdlusmomendi tekkimiseks valiti 2 CdTe, 2 CIS ja 2 kristallilise räni baasil päikesepaneeli.

Kuues peatükk käsitleb modelleeritud süsteemi ning analüüsitakse saadud tulemusi. Modelleeritud süsteemi puhul võeti aluseks 192 m² pindalaga elamu, kus praeguse seisuga elab 2 vanemat inimest, millest tingituna on pidevalt keegi kodus ja oleks võimalik ära kasutada päikesepaneelide poolt toodetud elektrienergiat. Antud elamu 2017 aasta elektritarbimine oli 2578 kWh Suurim tarbimine toimus sealjuures aasta kolmel esimesel kuul, moodustades umbes 35% aastasest kogu tarbimisest. Täpsemaks võrdlemiseks pandi PV süsteemide võimsused paika selle põhjal, kui palju paneele mahub fassaadile. Simuleeritud lahendustest, olid kõige parema tootlikkusega PV süsteemid, mis olid paigaldatud elamu 45° kaldkatusele.

Fassaadi installatsioonide korral langes süsteemide tootlikkus 34-48%, mis on tingitud väiksematest kiirgushulkadest ning varjutatusest. Samuti on antud hoone kirde suunas olev sein võrdlemisi madal, mistõttu poleks ka väga mõistlik sinna PV paneele paigaldada. Isegi kui suudaks kogu toodetud elektrienergia koha peal ära tarbida, siis tuleks siiski võrgust juurde osta, et rahuldada kogu aastane tarbimine.

Tingitud asjaolust, et elamu enda katuse puhul on tegemist kaldkatusega, siis lamekatusel olevate PV süsteemide uurimiseks tuli simuleerida olukord, kus paneelid on paigaldatud abihoonele. Probleeme valmistab antud lahenduse juures kõrvalhoone, mis tekitab paneelidele osaliselt varje ning ebapiisav pind, mille tulemusel varjestavad paneelid 20° paigalduse korral ise tagumisi päikesepaneeli. Selliste süsteemide tootlikkus novembrist jaanuarini on võrdlemisi olematu.

PV süsteemide tasuvusaeg on teadupärast seda kiirem, mida rohkem suudetakse toodetud elektrienergiat koha peal ära tarbida. Simuleeritud süsteemidest suudetakse enim koha peal ära tarbida kaldkatusele paigaldatud süsteemide puhul, moodustades keskmiselt 34,09% aastasest kogutarbimisest. Kõige vähem suudetakse katta aastast elektritarbimist fassaadi installatsioonide korral – keskmiselt 27,57%

PV süsteemi planeerimisel tuleb arvestada erinevate asjaoludega. Eratarbija puhul on üldiselt mõistlik ära kasutada vaba pinda katusel, kui pole tegemist just keeruka ehituse, mis tekitab palju varje. Linna oludes on kindlasti fassaadi installatsioonide potentsiaal suurem, kuna vaba pinda on kõrgemate hoonete puhul tunduvalt rohkem. Vaadeldud süsteemidest on kõige paremaks lahenduseks siiski kaldkatusel olevad süsteemid.

SUMMARY

The aim of this master's thesis was to compare the different installation methods for solar panels. In addition, an overview about the existing solar PV technologies and the current market situation was given. The two main PV systems were introduced as well – on-grid and off-grid. In order to compare the different installation methods, a building which is situated at Tartumaa was taken under investigation, electricity consumption data was gathered and a 3D situation was modelled. The 3D situation was made with the simulation software PV*SOL, where it is possible to simulate different solutions in order to get as accurate results as possible due to the fact, that the software takes many parameters into consideration while doing its calculations, including shadows.

In order to achieve the goals for the thesis the overall situation of the solar energy market and potential was taken under investigation in the first chapter. The share of solar energy has been steadily rising in the past years. Due to the fact, that the technology is being constantly improved, the prices have been in decline in the recent years and due to the directive, which requires all new buildings to be nearly zero energy buildings, it is expected that the solar energy share will keep rising in the future as well.

The second chapter describes the characteristics of different PV panels and their manufacturing processes. Currently the market is dominated by crystalline-silicon based PV panels, due to the fact, that this kind of technology has proven itself and has a better efficiency. It is expected though, that the thin film technologies will gain more market share in the following years.

Third chapter gives a brief overview about the nearly zero energy buildings and why this kind of direction has been taken. Solar panels are considered to be one of the best ways in order for a building to reach the status of a nearly zero energy building.

Fourth chapter describes the two most common PV energy systems – grid connected and autonomous systems. Both of the systems have their advantages and disadvantages. The

off-grid system is a good solution in places, where there is no grid connection and building it would be more expensive, than building a PV system.

Nowdays there's several softwares, which can give you a better overview of the output of PV systems at your desired location, that you can look into before making an actual decision. The softwares come in different difficulty levels. Fifth chapter gives an overview of the possibilities of the used software. This chapter also looks into how the irradiance changes depending on the angle of the plane it falls onto. The highest amount of annual irradiance from the observed situations was recieved, when the plane was at a 45° angle - $1095,70 \text{ kWh/m}^2$ and the least by the plane at 90° angle - $810,23 \text{ kWh/m}^2$. The technical data of the used PV panels were also displayed in this chapter. In order to have a better comparision, 6 panels were chosen – 2 CdTe, 2 CIS and 2 crystalline silicon PV panels.

In the sixth chapter, the modelled system and the results are analyzed. A building with an area of 192 m^2 was taken as the basis of the simulation. The only residents of the building are currently two elderly people and due to that there is always someone home and electricity is being consumed, which is why it would be good to use the electricity produced from PV panels. The annual electricity consumption of 2017 was 2578 kWh. 35% of the consumption happened during the first 3 months of the year. In order to compare the PV systems by their installation methods, the system powers were set in to place according to how many PV panels was possible to place onto the facade. The systems with the best annual output were the ones placed on the building's inclined roof.

The annual output of the PV systems dropped by 35-48%, when the panels were placed on the building's facade, which is due to smaller amounts of irradiance and shading. Also the south-east wall of the building is fairly low, which is why it would probably not be the best solution. Even if the residents could consume all the produced electricitiy by the PV panels, then it would still not be enough to satisfy the annual needs.

Due to the fact, that the building itself has an inclined roof, then it was required to simulate the situations, when the PV panels are placed on a flat roof, by placing them on top of an ancillary building. These solutions had problems with shading aswell, because the ancillary building is close to a higher building and due to the restricted roof space, the PV arrays themselves cast shadows to the ones behind them, when placed at a 20° angle. The output of these kind of systems is extremly low from november to january.

The payback period of the PV systems is shorter the more you are able to consume the produced electricity on site. In the simulated systems, the best numbers were shown in terms of own consumption, in the systems which were placed on the building's 45° roof. These systems manage to cover in average about 34,09% of the annual consumption. The worst systems in terms of covering the electricity consumptions, were the ones placed on the building's facade – covering in average 27,57% of the annual consumption.

While planning a PV system, several things have to be taken into consideration. In residential buildings it is usually smart to use the unused space on the roof, unless the roof structure is complicated, which leads to problems with shadows. The potential of the PV systems placed on building's facade is much higher in cities with higher buildings offering a lot of unused space. From the observed solutions, the most optional one would be the ones placed on the building's inclined roof. Taking into consideration the electricity consumption of the building used in simulation, it would not be rational to invest into a bigger system.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. Tartu Ülikool. Energiaallikas päikeseenergia. [veebileht] <https://dspace.ut.ee/bitstream/handle/10062/28239/sissejuhatus.html> (08.03.2018)
2. Energiatalgud. Päikeseenergeetika. [veebileht] <https://energiatalgud.ee/index.php?title=M%C3%B5iste:P%C3%A4ikeseenergeetika> (08.03.2018)
3. **Quaschnig, V.** (2004) Photovoltaic systems. – Renewable Energy World. Vol. 1. [on-line] <https://www.volker-quaschnig.de/articles/fundamentals3/index.php> (09.03.2018)
4. Taastuvenergia aastaraamat 2016. (2017). Tallinn: Eesti Taastuvenergia Koda. http://www.taastuvenergeetika.ee/wp-content/uploads/2017/06/TEK_aastaraamat_2016_A4_5mmBleed_31.05.2017-1.pdf (11.03.2018)
5. **Kabir, E., Kumar, P., Kumar, S., Adelodun, A., Kim, K.** (2018). Solar energy: potential and future prospects. – Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 82, pp. 894-900.
6. Renewables 2017 Global Status Report. (2018). Pariis: Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. http://www.ren21.net/gsr-2017/chapters/chapter_01/chapter_01/
7. Renewables 2017 Global Status Report. (2018). Pariis: Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2017/06/17-8399_GSR_2017_Full_Report_0621_Opt.pdf (15.03.2018).
8. Tartu Ülikool. Eelised ja puudused. [veebileht] https://dspace.ut.ee/bitstream/handle/10062/28239/eelised_ja_puudused.html (15.03.2018)
9. Greenmatch. Pros and Cons of Solar Energy. [on-line] <https://www.greenmatch.co.uk/blog/2014/08/5-advantages-and-5-disadvantages-of-solar-energy> (15.03.2018)
10. Energy informative. Solar Energy Pros and Cons. [on-line] <http://energyinformative.org/solar-energy-pros-and-cons/> (15.03.2018)
11. **Mahlapuu, Mihkel.** 2014. Päikeseelektrijaama toodangu simulatsioon ja majanduslik analüüs linnatingimustes asuvate hoonetel. Magistritöö. Tallinna Tehnika Ülikooli elektroenergeetika instituut. Tallinn.

12. GBI Research. 2012. Solar PV Power Market, Global, Cumulative Installed Capacity, Market Share by Technology Type (%). [on-line] <https://c1cleantechnicacom-wpengine.netdna-ssl.com/files/2013/06/thin-film-solar-market-share-2020.png> (17.03.2018)
13. Energiatalgud. Päikesepaneel. [veebileht] <https://energiatalgud.ee/index.php?title=P%C3%A4ikesepaneel&menu-119> (20.03.2018)
14. **Chu, Y.** (2011) Review and Comparison of Different Solar Energy Technologies. [on-line] <https://www.geni.org/globalenergy/research/review-and-comparison-of-solar-technologies/Review-and-Comparison-of-Different-Solar-Technologies.pdf> (20.03.2018)
15. Solar technology explained - the differences between crystalline and thin film, mono and poly etc. (2010). [on-line] <https://wbbcc.files.wordpress.com/2010/08/solar-technology-explained.pdf> (23.03.2018)
16. Solar Facts and Advice. Monocrystalline. [on-line] <http://www.solar-facts-and-advice.com/images/xmonocrystalline-solar-panel.jpg.pagespeed.ic.84CNqGNjNK.jpg> (23.03.2018)
17. Amerisolar. Polycrystalline solar panels. [on-line] http://webosolar.com/store/2266-thickbox_default/solarland-100w-12v-polycrystalline-solar-module-slp100-12u.jpg (25.03.2018)
18. Building Materials Online. Thin Film Solar Panels. [on-line] <https://buildingmaterials.com.my/wp-content/uploads/2015/06/solar-panel-thin-film-2.jpg> (25.03.2018)
19. Solmetric. Guide To Interpreting I-V Curve Measurements of PV Arrays. [on-line] <http://resources.solmetric.com/get/Guide%20to%20Interpreting%20I-V%20Curves.pdf> (05.04.2018)
20. Taastuenergia. MPPT kontrolleri tööpõhimõte. [veebileht] <http://www.taastuenergia.ee/paikese-ja-tuuleenergia-alased-infomaterjalid/mppt-kontroller/> (05.04.2018)
21. **Baliff, C., Heinsteins, P., Perret-Aebi, L.** (2013). Building Integrated Photovoltaics (BIPV): Review, Potentials, Barriers and Myths. – Green. Vol. 3, No. 2. [on-line] https://infoscience.epfl.ch/record/203559/files/Paper_754.pdf (29.03.2018)
22. **Pikk, P., Annuk, A.** (2014) Case study of increasing photovoltaic energy solar fraction in a conventional office building in northern latitudes. – Agronomy Research. Vol. 12, No. 2. [on-line] http://agronomy.emu.ee/vol122/2014_2_27_b5.pdf
23. **Biyik, E., Araz, M., Hepbasli, A., Shahrestani, M., Yao, R., Sha, L., Essah, E., Oliveira, A., Cano, T., Rico, E., Lechon, J., Andrade, L., Mendes, A., Atli, Y.** (2017). A key review of building integrated photovoltaic (BIPV) systems. – Engineering Science and

- Technology, an International Journal. Vol. 20, No. 3 [on-line] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2215098616309326> (02.04.2018)
24. PVsites. BIPV market and stakeholder analysis and needs. (2016). [on-line] <http://www.pvsites.eu/downloads/download/report-bipv-market-and-stakeholder-analysis-and-ne> (23.05.2018)
25. **Muiste, M., Veskimeister, J.** (2013). Tuule ja päikeseenergia kasutamine Tartu linnas. Hea uus linn OÜ. [on-line] https://energiatalgud.ee/img_auth.php/3/36/Tuule_ja_p%C3%A4ikeseenergia_kasutamine_Tartu_linnas.pdf (10.04.2018)
26. **Päsik, A.** (2011) Ehitisintegreeritud fotoelektriliste päikesepaneelide tootlikkus ja majanduslik tasuvus Eesti kliimas aastal 2011. [on-line] https://energiatalgud.ee/img_auth.php/2/29/P%C3%A4rsik%2C_A._Ehitisintegreeritud_fotoelektriliste_p%C3%A4ikesepaneelide_tootlikkus_ja_majanduslik_tasuvus_Eesti_kliimas_2011_.pdf (10.04.2018)
27. A-E-S Europe GmbH. Price trend PV modules. [on-line] https://www.europe-solar.de/catalog/index.php?main_page=page_3 (10.04.2018)
28. Energiatalgud. Hoonete energiatõhusus. [veebileht] https://energiatalgud.ee/index.php?title=Hoonete_energiat%C3%B5husus (10.04.2018)
29. Energiatalgud. Liginullenergiahoone. [veebileht] <https://energiatalgud.ee/index.php/M%C3%B5iste:Liginullenergiahoone> (10.04.2018)
30. Energy informative. Grid-Tied, Off-Grid and Hybrid Solar Systems. [on-line] <http://energyinformative.org/grid-tied-off-grid-and-hybrid-solar-systems/> (14.04.2018)
31. Energogen. Võrguühendusega (off-grid) päikeseenergia. [veebileht] <http://energogen.ee/paikeseenergia/vorguuhenduseta/> (14.04.2018)
32. Valentin-Software. Help. [on-line] http://help.valentin-software.com/pvsol/en/html/en/Berechnungsgrundlagen_-_Strahlungsprozessor.htm (21.05.2018)
33. **Maleki, S., Hizam, H., Gomes, C.** (2017). Estimation of Hourly, Daily and Monthly Global Solar Radiation on Inclined Surfaces: Models Re-Visited. – Energies. Vol. 10 [on-line] <http://www.mdpi.com/1996-1073/10/1/134> (21.05.2018)
34. Solar Frontier. CIS Modules. [on-line] <http://www.solar-frontier.com/eng/solutions/modules/S002210.html> (25.04.2018)
35. Avancis. PowerMax 3.5. [on-line] <https://solarclarity.nl/wp-content/uploads/2015/11/Avancis-Powermax-3.5.pdf> (25.04.2018)

36. Calyxo. CX3 Datasheet. [on-line]
http://calyxo.com/files/pro_construct/download/datasheet/cx3/CX3-VDE-MC-MC4-77-87W-EN.pdf (25.04.2018)
37. SolarDesignTool. FirstSolar FS-4122-3 (122 W) Solar Panel. [on-line]
<http://www.solardesigntool.com/components/module-panel-solar/First-Solar/3899/FS-4122-3/specification-data-sheet.html>
38. Ecodelta. High performance 72 cell monocrystalline solar photovoltaic module. [on-line]
<http://www.ecodeltapower.com/upfile/201703/5.pdf> (03.05.2018)
39. WINAICO. WINAICO PST-6 Perc. [on-line]
http://www.winaico.com/fileadmin/redaktion/downloads/Datenblaetter_2017/AUS/WINAICO_d221_Datasheet_WST_P6_PERC_AUS_1216_mailing.pdf. (07.05.2018)

LISAD

Lisa A. PV süsteemide tootlikkus

Tabel A.1. PV süsteemide toodetud elektrienergia sõltuvalt paigaldusviisist

	Toodetud elektrienergia, kWh												
	Jaanu	Veebru	Märts	Aprill	Mai	Juuni	Juuli	August	September	Oktoober	November	Detsember	Kokku
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Fassaad													
SF170-S	66,62	101,75	215,86	233,29	242,10	212,15	221,64	189,38	154,74	97,79	33,53	24,15	1792,99
PowerMax													
SKALA	50,84	84,41	185,45	197,15	205,87	182,62	189,45	158,92	130,43	81,41	26,02	18,18	1510,75
CX3 85	52,79	81,72	166,35	174,58	148,85	122,58	125,85	131,79	118,34	77,13	27,12	18,55	1245,66
FS-4122-3	78,47	124,05	258,13	300,05	305,25	248,81	268,24	242,57	191,48	120,31	41,51	28,55	2207,42
ECO-350M	72,03	107,09	224,39	239,60	231,61	179,50	196,07	185,99	159,41	92,76	33,70	26,55	1748,71
WST 285-P6	76,70	123,38	238,11	243,36	244,10	201,25	215,11	192,38	163,69	106,34	41,59	31,69	1877,71
Katus													
SF170-S	58,05	111,09	268,93	348,03	414,31	401,94	407,60	313,97	218,54	117,48	36,24	23,60	2719,77
PowerMax													
SKALA	58,51	104,34	236,52	291,96	343,54	333,01	336,06	259,14	187,20	106,09	34,50	21,46	2312,33
CX3 85	54,52	101,01	235,17	304,20	363,84	354,14	359,73	278,78	195,31	108,49	34,29	20,30	2409,78
FS-4122-3	90,70	162,28	370,61	471,04	558,19	541,57	549,65	425,45	303,47	170,57	55,91	34,37	3733,81
ECO-350M	80,76	142,70	319,12	391,77	456,67	443,15	447,16	345,52	251,77	143,99	47,98	30,64	3101,23
WST 285-P6	66,63	129,45	291,90	362,01	419,39	406,49	408,66	321,21	233,04	130,52	44,40	32,71	2846,40
Lamekatuse (0°)													
SF170-S	11,80	52,68	154,70	279,90	391,26	416,13	411,13	287,73	156,17	62,26	11,75	2,95	2238,45
PowerMax													
SKALA	7,63	40,86	121,59	218,57	303,18	322,80	317,02	220,67	121,36	47,83	8,68	2,33	1732,51
CX3 85	8,03	43,07	132,97	254,08	360,25	390,19	383,55	264,52	139,52	53,10	9,53	3,91	2042,71
FS-4122-3	11,01	63,71	198,88	381,15	534,82	577,10	565,97	391,80	207,14	76,91	13,20	5,29	3026,97
ECO-350M	8,30	51,63	162,53	295,72	408,02	439,52	427,96	298,57	162,05	61,82	10,26	3,90	2330,25
WST 285-P6	11,91	56,29	150,49	253,33	348,25	373,40	363,12	253,30	141,52	59,25	12,30	4,26	2027,39
Lamekatuse (20°)													
SF170-S	19,58	74,24	206,07	317,87	411,62	419,35	417,73	304,18	184,97	85,89	18,15	3,77	2463,40

Tabel A.1. järg

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
PowerMax SKALA	16,53	61,55	171,88	259,74	332,13	335,60	333,83	244,48	152,14	69,47	14,81	2,57	1994,70
CX3 85	7,35	39,60	173,26	303,50	401,66	409,86	410,00	296,06	167,62	60,54	8,16	3,68	2281,27
FS-4122-3	10,04	56,10	252,70	445,73	588,72	601,50	599,04	433,33	244,56	86,26	11,08	4,98	3334,02
ECO-350M	8,43	32,91	127,88	329,58	462,91	469,79	466,95	334,03	154,81	37,17	9,20	3,97	2437,60
WST 285-P6	18,99	72,00	174,21	296,54	385,89	389,37	386,33	283,59	152,70	51,44	14,66	5,17	2230,88

Lisa B. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Mina, Kunnar Kangro,
sünniaeg 17.06.1992,

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda koostatud lõputöö

Päikesepaneelide erinevate paigaldusviiside eelised ja puudused,
mille juhendaja(d) on Andres Annuk ja Alo Allik,

1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,

1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja

1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor _____
(allkiri)

Tartu, _____
(kuupäev)

Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

(juhendaja nimi ja allkiri)

(kuupäev)

(juhendaja nimi ja allkiri)

(kuupäev)